



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Ingeniería Mecánica

**Aplicación de la lógica difusa para
detección de defectos en rodamientos**

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

Autor: Jesús Hernández Solano
Tutor: Cristina Castejón Sisamón



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Me gustaría aprovechar la ocasión para dar las gracias a todas las personas que han hecho posible este proyecto.

En primer lugar me gustaría recordar a los compañeros que me han acompañado a lo largo de este camino: Alberto, Nacho, Javier , Juan, Pablo, Nico...ha sido un placer aprender con vosotros, pero sobre todo de vosotros.

Gracias a todos los profesores que han contribuido en mi formación académica y personal, y en especial a mi directora del proyecto, Cristina Castejón, por toda su paciencia y dedicación.

Pero sobre todo, quiero agradecer enormemente a mis padres, a mi hermano Adri y a Paula, por que han confiado siempre e incondicionalmente en mí y han sacrificado mucho para que yo consiga siempre lo que me propongo.

Sin su apoyo habría sido imposible llegar hasta aquí.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	OBJETIVO DEL PROYECTO	10
1.2	DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO.....	11
2.	MARCO TEÓRICO DEL PROYECTO.	13
2.1	RODAMIENTOS Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	13
2.2	FRECUENCIAS NATURALES DE BOLA Y PISTA	17
2.3	OBTENCIÓN ANALÍTICA DE LAS FRECUENCIAS NATURALES DE FALLO EN UN RODAMIENTO	18
2.3.1	FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL TREN DE ELEMENTOS (FTF) 19	
2.3.2	FRECUENCIA DE PASO DE LAS BOLAS POR LA PISTA EXTERIOR (BPFO) 20	
2.3.3	FRECUENCIA DE PASO DE LAS BOLAS POR LA PISTA INTERIOR (BPFI) 21	
2.3.4	FRECUENCIA DE GIRO DE LAS BOLAS (BSF).....	22
2.4	RESUMEN DE FRECUENCIAS NATURALES DE FALLO EN UN RODAMIENTO	23
2.5	MODELO DE VIBRACIÓN PARA UN RODAMIENTO CON DEFECTO LOCALIZADO	24
2.5.1	CONSIDERACIONES PARA EL MODELO.....	24
2.5.2	DESARROLLO DEL MODELO	25
2.6	FACTORES CAUSANTES DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS.	29
2.7	TIPOS DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS.	32
2.8	PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.	37
2.8.1	EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.	37
2.8.2	LA TRANSFORMADA DE FOURIER.....	38
2.8.3	SHORT TIME FOURIER TRANSFORM (STFT)	39
2.8.4	TRANSFORMADA DE HILBERT.....	42
2.9	FUNDAMENTOS DE LÓGICA DIFUSA	43
2.9.1	CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES DE PERTENENCIA.....	45
2.9.2	INFERENCIA DIFUSA.....	47
2.9.3	DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA.	48
2.9.4	MECANISMOS DE INFERENCIA.	49
2.9.5	MÉTODOS DE DESDIFUSIÓN	52
3.	SISTEMA EXPERIMENTAL	53
3.1	INTRODUCCIÓN.....	53
3.2	EQUIPO DE ENSAYO	53
3.3	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	55
3.4	NOMENCLATURA DE LAS SEÑALES UTILIZADAS.....	56
4.	DESARROLLO DEL PROYECTO	58
4.1	INTRODUCCIÓN	58
4.2	PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES	59
4.2.1	ANÁLISIS DE LA SEÑAL MEDIANTE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.....	60
4.2.1.1	RODAMIENTO SIN DEFECTO.....	60
4.2.1.2	RODAMIENTO CON DEFECTO EN BOLA.....	62
4.2.1.3	RODAMIENTO CON DEFECTO EN PISTA INTERNA.....	64
4.2.1.4	RODAMIENTO ON DEFECTO EN PISTA EXTERNA.	66



4.2.1.5	CONCLUSIONES DEL USO DE LA REPRESENTACIÓN TEMPORAL Y LA TRANSFORMADA DE FOURIER.	68
4.2.2	TRANSFORMADA DE HILBERT.....	68
4.2.2.1	RODAMIENTO SIN DEFECTO.....	68
4.2.2.2	RODAMIENTO CON DEFECTO EN BOLA.....	72
4.2.2.3	RODAMIENTO CON DEFECTO EN PISTA INTERNA.....	75
4.2.2.4	RODAMIENTO CON DEFECTO EN PISTA EXTERNA.....	78
4.2.2.5	CONCLUSSIONES DEL USO DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT.80	
4.3	CLASIFICADOR BASADO EN LÓGICA DIFUSA.....	82
4.3.1	INTRODUCCIÓN.	82
4.3.2	EDITOR DE CLASIFICADORES DIFUSOS (FIS EDITOR)	82
4.3.3	EDITOR DE FUNCIONES DE PERTENENCIA (MEMBERSHIP FUNCTION EDITOR).....	84
4.3.4	CREACIÓN DE FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LAS VARIABLES DE ENTRADA.	86
4.3.5	CREACIÓN DE FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LAS VARIABLES DE SALIDA, AGREGACIÓN LÓGICA Y DESDIFUSIÓN.....	88
4.3.6	EDITOR DE REGLAS DIFUSAS (RULE EDITOR).....	90
4.3.7	REGLAS DIFUSAS.....	92
4.3.8	RESULTADOS OBTENIDOS CON EL CLASIFICADOR DIFUSO.	93
4.4	CLASISFICADOR DIFUSO INDEPENDINTE DE LA VELOCIDAD.....	99
4.4.1	INTRODUCCIÓN.....	99
4.4.2	RESULTADOS OBTENIDOS	101
4.5	DESARROLLO DE UN INTERFAZ GRÁFICO PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS.....	115
4.5.1	INTRODUCCIÓN.....	115
4.5.2	DISEÑO DE UNA GUI.....	115
5	CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	124
5.1	CONCLUSIONES.....	124
5.2	FUTUROS DESARROLLOS	127
6	BIBLIOGRAFÍA	128
7	ANEXOS	130
7.1	HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL RODAMIENTO.	130
7.2	HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL ACELERÓMETRO.....	131
7.3	REGLAS DIFUSAS UTILIZADAS	132

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Amplitud y periodicidades de la función $\alpha(t)$ con respecto a la ubicación del defecto	27
Tabla 2	Frecuencias de variación de los pulsos [6]	28
Tabla 3	Tipos de desgaste: descripción, causas y acción correctiva [8].....	32
Tabla 4	Principales campos de aplicación de la lógica difusa en la industria	43
Tabla 5	Probabilidad vs Difusividad [13]	44
Tabla 6	Tablas clásicas de verdad para los operadores lógicos AND, OR y NOT	50
Tabla 7	Tablas de verdad para lógica difusa	51
Tabla 8	Características rodamiento ER10K	55
Tabla 9	Muestras necesarias para cada velocidad de giro	56
Tabla 10	Frecuencias naturales de fallo para cada frecuencia de giro	58
Tabla 11	Frecuencias naturales de fallo entre frecuencia de giro.....	59
Tabla 12	Posición de los 5 picos de frecuencia más importantes. Rodamiento con defecto en bola a 30 Hz	73
Tabla 13	Análisis de frecuencias de la señal B-30-50000-3	74
Tabla 14	Análisis de frecuencias I-30-50000-3.....	77
Tabla 15	Análisis de frecuencias O-30-50000-3	80
Tabla 16	Frecuencias encontradas mediante transformada de Hilbert.....	81
Tabla 17	Frecuencias naturales de fallo entre 90 y 300Hz.....	86
Tabla 18	Resultados para el rodamiento con fallo en bola (30Hz)	95
Tabla 19	Resultados para el rodamiento con fallo en pista externa (30Hz).....	96
Tabla 20	Resultados para el rodamiento con fallo en pista interna (30Hz).....	97
Tabla 21	Resultados para el rodamiento con fallo en buenas condiciones (30Hz)	98
Tabla 22	Tasa de aciertos para el clasificador difuso para rodamientos a velocidad de 30 Hz	99
Tabla 23	Funciones de pertenencia para el clasificador independiente de la velocidad	100
Tabla 24	Resultados para el rodamiento con fallo en pista interna (30Hz).....	102
Tabla 25	Resultados para el rodamiento con fallo en bola (30Hz)	103
Tabla 26	Resultados para el rodamiento con fallo en pista externa (30Hz).....	104
Tabla 27	Resultado para el rodamiento en buenas condiciones (30Hz).....	105
Tabla 28	Resultados para el rodamiento con fallo en pista interna (20Hz).....	106
Tabla 29	Resultados para el rodamiento con fallo en pista externa (20Hz).....	107
Tabla 30	Resultados para el rodamiento con fallo en bolas (20Hz).....	108
Tabla 31	Resultados para el rodamiento en buenas condiciones (20Hz)	109
Tabla 32	Resultados para el rodamiento con fallo en pista interna (10 Hz).....	110
Tabla 33	Resultados para el rodamiento con fallo en la pista externa (10Hz)	111
Tabla 34	Resultados para el rodamiento con fallo en bola (10Hz)	112
Tabla 35	Resultado para el rodamiento en buenas condiciones (10Hz).....	113
Tabla 36	Tasas de acierto para el rodamiento a 30 Hz.....	114
Tabla 37	Tasas de acierto para el rodamiento a 20 Hz.....	114
Tabla 38	Tasas de acierto para el rodamiento a 10 Hz.....	114

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Esquema del desarrollo del proyecto.....	11
Ilustración 2 Rodamiento de una hilera de bolas con contacto angular	14
Ilustración 3 Condiciones de lubricación [1].....	17
Ilustración 4 Vista frontal y transversal de un rodamiento de bolas [3].....	19
Ilustración 5 Modelo de rodamiento excitado por un defecto localizado en pista externa [5]	26
Ilustración 6 Distribución de carga radial para un rodamiento [6].....	28
Ilustración 7 Factores que provocan defectos en rodamientos	29
Ilustración 8 Rodamiento con corrosión.....	31
Ilustración 9 Rodamiento con desgaste producido por partículas abrasivas	32
Ilustración 10 Rodamiento con desgaste producido por problemas de lubricación	33
Ilustración 11 Rodamientos con desgaste producido por problemas de vibración para rodamiento de rodillos y bolas respectivamente.....	33
Ilustración 12 Rodamiento con indentación debida a montaje inapropiado.....	34
Ilustración 13 Rodamiento con indentación debida a partícula abrasiva.	34
Ilustración 14 Secuencia del <i>fenómeno flaking</i>	35
Ilustración 15 Rodamiento con Smearing en su pista exterior.	36
Ilustración 16 Superficies de contacto en un rodamiento.....	36
Ilustración 17 Modelo de sistema excitado	37
Ilustración 18 Análisis tiempo frecuencia de varias señales	39
Ilustración 19 Espectrograma 3D con intervalos temporales pequeños	41
Ilustración 20 Espectrograma 3D con intervalos temporales grandes.....	41
Ilustración 21 Transformada de Hilbert de una onda cuadrada.....	42
Ilustración 22 Esquema de desarrollo de la lógica difusa en comparación con métodos clásicos [13].....	44
Ilustración 23 Lógica clásica versus lógica difusa	46
Ilustración 24 Funciones de pertenencia más empleadas: (a) Triangular, (b) Trapezoidal, (c) Gaussiana y (d) Sigmoideal	46
Ilustración 25 Diagrama de bloques de un sistema de control basado en lógica difusa. 48	
Ilustración 26 Actuación de los operadores AND, OR y NOT en lógica clásica y difusa	51
Ilustración 27 Máquina de ensayo de rodamientos	53
Ilustración 28 Acelerómetro	54
Ilustración 29 Amplificador.....	54
Ilustración 30 Tarjeta de adquisición de datos	55
Ilustración 31 Rodamiento ER10K	55
Ilustración 32 Señal I-30-5000-2	57
Ilustración 33 Rodamiento sin defecto girando a 10 Hz	60
Ilustración 34 Rodamiento sin defecto girando a 20 Hz	61
Ilustración 35 Rodamiento sin defecto girando a 30 Hz	61
Ilustración 36 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 20 Hz	62
Ilustración 37 Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz.....	62
Ilustración 38 Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz.....	63
Ilustración 39 Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz.....	63
Ilustración 40 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz	64
Ilustración 41 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz.....	64



Ilustración 42 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 20 Hz.....	65
Ilustración 43 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 30 Hz.....	65
Ilustración 44 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a 20 Hz.....	66
Ilustración 45 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 10 Hz	66
Ilustración 46 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 20 Hz	67
Ilustración 47 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 30 Hz	67
Ilustración 48 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista externa a 20 Hz	67
Ilustración 49 Rodamiento sin defecto girando a 10 Hz	69
Ilustración 50 Rodamiento sin defecto girando a 20 Hz	69
Ilustración 51 Rodamiento sin defecto girando a 30 Hz	69
Ilustración 52 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 30 Hz	70
Ilustración 53 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 20 Hz	71
Ilustración 54 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 10 Hz	71
Ilustración 55 Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz.....	72
Ilustración 56 Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz.....	72
Ilustración 57 Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz.....	72
Ilustración 58 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz	73
Ilustración 59 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz.....	75
Ilustración 60 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 20 Hz.....	75
Ilustración 61 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 30 Hz.....	75
Ilustración 62 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a 10 Hz.....	76
Ilustración 63 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a 20 Hz.....	76
Ilustración 64 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a 30 Hz.....	77
Ilustración 65 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 10 Hz	78
Ilustración 66 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 20 Hz	78
Ilustración 67 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 30 Hz	78
Ilustración 68 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista externa a 10 Hz	79
Ilustración 69 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista externa a 20 Hz	79
Ilustración 70 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista externa a 30 Hz	80
Ilustración 71 <i>FIS EDITOR</i>	83
Ilustración 72 <i>FIS EDITOR</i> correspondiente al problema concreto del presente proyecto.	84
Ilustración 73 <i>MEMBERSHIP FUNCTION EDITOR</i>	85
Ilustración 74 Gaussiana de desviación típica 2 y media 5	87
Ilustración 75 Creando la función de pertenencia BPFI.....	88
Ilustración 76 Variable MAX1 con todas sus funciones de pertenencia.....	88
Ilustración 77 Función de pertenencia para la variable EXTERNA (% de fallo en pista externa)	89



Ilustración 78 Triangular de escalares 3,6 y 8	90
Ilustración 79 RULES EDITOR.....	91
Ilustración 80 <i>RULES VIEWER</i>	94
Ilustración 81 Funciones de pertenencia para el clasificador independiente de la velocidad.....	100
Ilustración 82 Creación de una nueva GUI	116
Ilustración 83 GUI en blanco.....	117
Ilustración 84 Fichero figura1.m	117
Ilustración 85 Creación de un cuadro de texto estático	118
Ilustración 86 Ventana de Propety Inspector.....	119
Ilustración 87 Formato final del archivo figura1.fig	120
Ilustración 88 Formato final del fichero figura1.m	121
Ilustración 89 Ejemplo de utilización del interfaz gráfico	123
Ilustración 90 Hoja de características del rodamiento utilizado.....	130
Ilustración 91 Hoja de características del acelerómetro utilizado	131



1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se enmarca en el mantenimiento predictivo de elementos de mecánicos, más concretamente en rodamientos.

El mantenimiento de máquinas ha sido siempre uno de los temas que ha ocupado las mentes de los ingenieros a lo largo del tiempo. Antes de la Revolución Industrial existía lo que hoy en día conocemos con el nombre de mantenimiento correctivo, por el cual cuando un componente mecánico de una máquina fallaba era reparado o reemplazado por otro. Es decir, se realizaba el mantenimiento una vez producido el fallo. Esto obligaba a detener la máquina y por tanto parar la producción con las consecuencias económicas que ello acarrea.

Con la llegada de la Revolución Industrial aparece el concepto de mantenimiento preventivo. Esta nueva concepción del mantenimiento persigue establecer una vida útil de los componentes para que éstos puedan ser reemplazados antes de que se produzca su rotura. Por primera vez es posible programar la producción evitando paradas imprevistas y adecuando los tiempos de mantenimiento a las necesidades productivas. El inconveniente de este método de mantenimiento es que en ocasiones se desperdician componentes cuya vida útil todavía no ha llegado a su fin y que podrían seguir funcionando por más tiempo.

En los últimos tiempos las tendencias en el mantenimiento industrial han evolucionado hacia el mantenimiento predictivo. En este tipo de mantenimiento se pretende, mediante la monitorización de distintos parámetros del componente (amplitud de las vibraciones, temperatura...) conocer el estado del mismo en tiempo real y detectar el fallo cuando éste es todavía incipiente, pudiéndose programar una parada para su sustitución. Las ventajas de este tipo de mantenimiento frente a los otros, es que no se desperdicia vida útil de los distintos componentes mecánicos y que sigue brindando la posibilidad de programar los tiempos de parada y mantenimiento de la máquina, maximizando la productividad de ésta.

El presente proyecto se centrará, en el mantenimiento predictivo de rodamientos. Estos componentes suelen ser concebidos y diseñados dentro de una máquina para ser



los primeros en fallar, debido a su bajo coste y fácil sustitución. Por ello es de vital importancia el conocimiento de sus estado, para predecir el buen funcionamiento de la máquina.

Este tipo de componentes mecánicos tiene además la particularidad de tener tres partes bien diferenciadas:

- La pista externa.
- La pista interna.
- Los elementos rodantes (típicamente bolas o cilindros).

Por tanto, además de intentar predecir el momento en el que se producirá el fallo, será importante localizar dónde se producirá éste.

Uno de los parámetros más estudiados para evaluar el estado de un componente mecánico es la señal de vibración. A lo largo de este proyecto se abordará la conveniencia de utilizar técnicas tradicionales de tratamiento de señales, como la Transformada de Fourier o análisis más modernos.

1.1 OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es detectar fallos con cierto nivel de incipiente de rodamientos en servicio utilizando técnicas de mantenimiento predictivo.

En primer lugar, se pretende realizar una comparación entre diferentes métodos de tratamiento de señales, con el objetivo de discernir cuál es el más adecuado para analizar señales de vibración de rodamientos con distintos modos de fallo (fallo en pista interna, en pista externa o en bolas). En este sentido, se comenzará estudiando la Transformada de Fourier (FT), para dar paso a la Transformada de Hilbert (HT), técnica que permite el tratamiento de señales no estacionarias.

En un segundo término, se utilizarán estas señales tratadas para diseñar un sistema clasificador basado en lógica difusa o borrosa, que interprete las vibraciones de

distintos rodamientos y que sea capaz de distinguir si nos encontramos ante un rodamiento:

- Con fallo en bola.
- Con fallo en la pista externa.
- Con fallo en la pista interna.
- Normal (en buen estado y sin defectos incipientes).

A continuación, en la ilustración1, se muestra un esquema-resumen del desarrollo del proyecto.

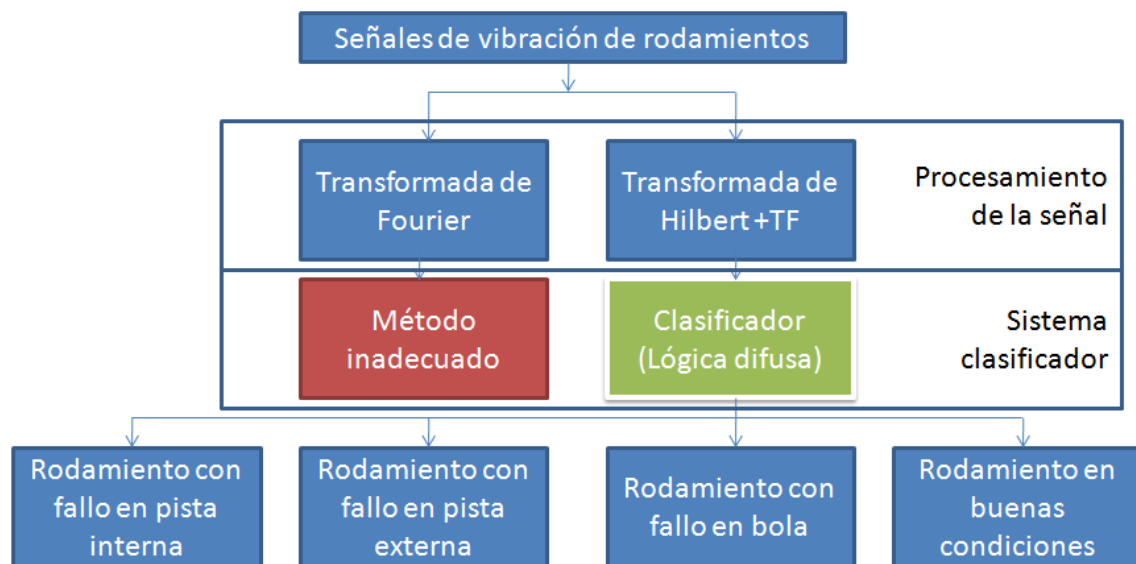


Ilustración 1 Esquema del desarrollo del proyecto

1.2 DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

Como ya se introdujo en el objetivo del proyecto, éste se compone de dos partes fundamentales. En la primera parte del proyecto se van a desarrollar distintas técnicas de tratamiento de señales intentando concluir como objetivo de la primera parte, cuál es la técnica más apropiada para nuestro caso de estudio y para la obtención de las frecuencias de fallo de los cuatro tipos de rodamiento. Profundizando un poco más en este aspecto, las técnicas que vamos a desarrollar son: La Transformada de Fourier y la Transformada de Hilbert.



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

En la segunda parte del proyecto, partiremos de la técnica de tratamiento que hayamos considerado más adecuada, para realizar un sistema clasificador basado en la Lógica Difusa. Este clasificador, debe será capaz de decidir, a partir de las frecuencias de fallo de una señal de vibración de un rodamiento, del tipo de rodamiento que se trata, distinguiendo entre cuatro condiciones:

- Rodamiento con fallo en una bola.
- Rodamiento con fallo en pista externa.
- Rodamiento con fallo en pista interna.
- Rodamiento en condiciones normales.

Como colofón al presente proyecto, se ha decidido implementar un interfaz gráfico de usuario, que permita a cualquier persona, sin conocimientos añadidos de programación, conocer tanto si un rodamiento presenta un defecto, como dónde lo presenta.



2. MARCO TEÓRICO DEL PROYECTO.

En este apartado se va a realizar una introducción teórica sobre conceptos clave para el entendimiento global del proyecto. Los temas más destacados dentro de esta nota teórica serán: Los rodamiento y sus defectos, técnicas de procesamiento de señales y fundamentos de lógica difusa o borrosa.

2.1 RODAMIENTOS Y SUS CARACTERÍSTICAS

Los rodamientos son componentes mecánicos muy usados en la industria, en la mayoría de las ocasiones como elementos transmisores de carga entre elementos mecánicos con giro relativo entre sí [1].

Aunque hoy en día los rodamientos han evolucionado mucho y por consiguiente sus vidas útiles se han visto incrementadas, muchos de éstos todavía suelen fallar. Estos fallos pueden, a su vez causar paros en procesos críticos de la producción industrial.

El análisis de vibraciones en los rodamientos se estudia desde hace varias décadas, y con el paso del tiempo ha ido mejorando con diversas técnicas, las cuales han abordado el problema desde varios puntos de vista.

En el mercado existen rodamientos de numerosos tamaños y diseños. A grandes rasgos, se pueden dividir en dos grandes categorías [1]:

- Rodamientos de carga radial: Aquellos que soportan la carga en la dirección radial, es decir, en dirección perpendicular a su eje.
- Rodamientos de carga axial: -aquellos que soportan la carga en la dirección del eje.

En ocasiones un rodamiento puede soportar carga axial y radial al mismo tiempo. Dentro de los rodamientos de carga radial, se encuentran: los rodamientos rígidos de bolas, rodamientos de bolas a rótula, rodamientos de bolas con contacto angular, rodamientos de rodillos cilíndricos, rodamientos de agujas, rodamientos de rodillos a rótula y de rodillos cónicos [1].



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Dentro del presente proyecto, de todos estos tipos citados, se trabajará con rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular como el que puede observarse en la ilustración 2.

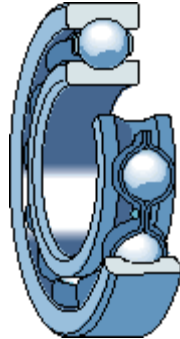


Ilustración 2 Rodamiento de una hilera de bolas con contacto angular

Los rodamientos de una hilera de bolas, son los más empleados en la industria para solicitaciones de poca carga y alta velocidad.

En sus pistas se encuentran los caminos de rodadura continuos y profundos. Son adecuados para soportar cargas axiales en cualquiera de los dos sentidos incluso a altas velocidades.

Estos rodamientos están contruidos con aceros templados (SAE 52100). Los aceros templados tienen la siguiente composición aproximada:

- 1% de carbono
- 1.55 % de Cromo. Situado en las bolas y las pistas. EL cromo ha de tener una gran pureza según norma DIN/ISO 281.

En su funcionamiento pueden alcanzar hasta 125°C, aunque existen rodamientos fabricados de materiales especiales que pueden soportar temperaturas más elevadas.

En esta ilustración 2 pueden apreciarse perfectamente las distintas partes de un rodamiento de una hilera de bolas:

- Bola.
- Pista interior.
- Jaula.



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

- Retén (En los casos que se requiera).
- Pista exterior.

La jaula de un rodamiento, tiene como misión principal, separar los elementos rodantes entre sí, a una determinada distancia, que asegure que éstos no entran en contacto. Esto minimiza el rozamiento dentro del rodamiento y por consiguiente la generación de calor. Cuando los rodamientos están lubricados con grasa, ésta se adhiere a la jaula permitiendo una lubricación continua sin necesidad de ningún elemento auxiliar. Por el contrario cuando los rodamientos están lubricados con aceite, se requiere el empleo de unos elementos denominados retenes, que consiguen la estanqueidad del rodamiento, para que el lubricante no se salga de los mismos. Las jaulas en general no se ven afectadas por agentes lubricantes o disolventes orgánicos. Aunque la presencia de agua plantea un riesgo de corrosión.

Las características más importantes inherentes a los rodamientos son:

- La holgura:

La holgura es el desplazamiento relativo de una pista respecto de la otra. Esta holgura no solo afecta a los ángulos de contacto sino también a los esfuerzos, deformaciones, distribución de carga y resistencia a la fatiga del rodamiento.

Las causas principales que suelen causar esta holgura son: interferencias entre el eje donde se monta el rodamiento y la pista interior de éste, acabado superficial de las superficies y los cambios de temperatura.

Los fabricantes recomiendan que, en servicio, un rodamiento de bolas posea una holgura pequeña, que varíe entre 0.1 y 1 mm aproximadamente [2], por lo que en ocasiones es necesario aplicar una precarga.

- La precarga:

La precarga tiene como principales funciones: eliminar la holgura radial y axial, incrementar la rigidez del conjunto eje-rodamiento, reducir el efecto de las ondulaciones de las pistas y homogeneizar los ángulos de contacto entre los elementos rodantes y las



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

pistas de los rodamientos, incluso cuando estos giran a alta velocidad. La precarga debe ser la mínima requerida. El motivo es que así se reduce la generación de calor, que es uno de los factores principales que disminuye la vida en servicio del rodamiento [1].

- La carga:

La carga transmitida a través de los elementos rodantes de una pista a la otra depende de la geometría interna del rodamiento, de la magnitud y del tipo de carga (ya sea dinámica o estática). Cuando se varían las condiciones de carga y velocidad en la máquina, se debe tener en cuenta la posible repercusión sobre sus componentes.

- Vida nominal:

Mediante la ecuación (1) es posible calcular la vida nominal de un rodamiento (norma DIN/ISO 281) [1].

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60.n} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (1)$$

Donde:

L_{10h} : Vida nominal, en horas de servicio.

n : Velocidad de giro, en [r/min.].

C : Capacidad de carga dinámica, en [N].

P : Carga dinámica equivalente, en [N].

En esta ecuación, puede observarse como a velocidad constante, un incremento de la carga disminuye de manera significativa la resistencia a fatiga del rodamiento y en consecuencia su vida nominal.

- La lubricación:

Una adecuada lubricación es fundamental para el correcto funcionamiento de los rodamientos. La cantidad y el tipo de lubricante tienen un efecto muy importante sobre las propiedades y vida de servicio de los rodamientos.

Las principales funciones del lubricante se pueden resumir en:

- Evita el contacto entre los metales del rodamiento disminuyendo la fricción, que es la principal causa de generación de calor.
- Transmitir la carga entre los elementos del rodamiento.

A su vez existen también distintas condiciones de lubricación, entre las que cabe destacar:

- Condición capa límite.
- Lubricación mixta.
- Lubricación hidrodinámica.

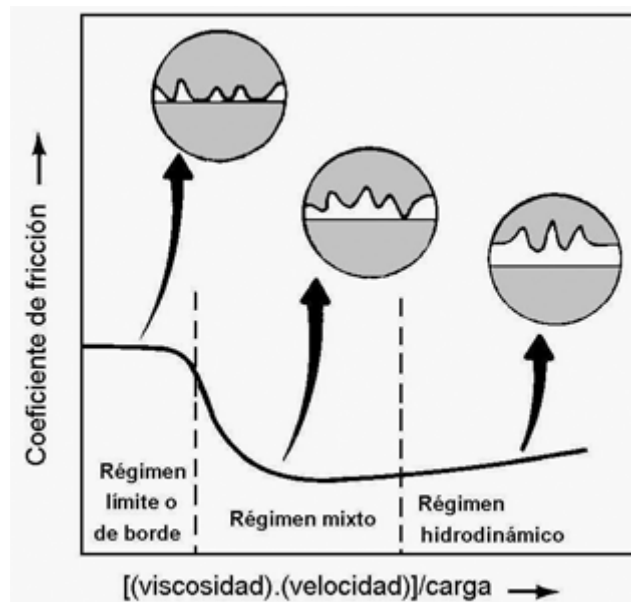


Ilustración 3 Condiciones de lubricación [1]

2.2 FRECUENCIAS NATURALES DE BOLA Y PISTA

Los rodamientos se eligen para que soporten una determinada vida en servicio. Esta vida útil, se calcula suponiendo que se realiza una instalación adecuada del rodamiento y que éste operará con las condiciones de diseño establecidas en los catálogos del fabricante. Sin embargo, se ha observado que en muchas ocasiones, los rodamientos fallan antes de que finalice la vida útil estimada. Cuando aparece un defecto en alguna de las partes del rodamiento, dicho defecto produce una vibración que excita las frecuencias naturales de vibración de las bolas y las pistas [2].



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Las frecuencias naturales para los modos de vibración de las bolas y pistas de un rodamiento, pueden ser calculadas teóricamente a partir de las ecuaciones (2) y (3).

$$w_{nb} = \frac{0.848}{d} \sqrt{\frac{E}{2\rho}} \quad (2)$$

$$w_{nr} = \frac{i(i^2 - 1)}{a^2 \sqrt{1 + i^2}} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (3)$$

Donde:

w_{nb} : Frecuencia natural de las bolas.

w_{nr} : Frecuencia natural de las pistas, en modo $n = i$.

i : Modo de vibración (2,3,4,...).

a : Radio del eje.

I : Momento de inercia de la sección transversal del rodamiento.

E : Modulo de elasticidad del material del rodamiento.

m : Masa de la pista por unidad de longitud.

d : Diámetro de las bolas

ρ : Densidad del metal del rodamiento.

Está demostrado, que cuando los rodamientos son montados sobre los ejes, las frecuencias naturales no varían significativamente. Además debemos decir que, la frecuencia de las bolas suele ser en general más alta que la de las pistas.

2.3 OBTENCIÓN ANALÍTICA DE LAS FRECUENCIAS NATURALES DE FALLO EN UN RODAMIENTO

En servicio sólo una pequeña región del rodamiento experimentará la carga en un momento determinado. Esta área se denomina zona de carga y tiene lugar en ambas pistas para cada revolución.

Durante cada revolución del rodamiento, un número determinado de bolas pueden ser golpeadas por un defecto en alguna de las pistas. Este número es función del tamaño del defecto, geometría del rodamiento y longitud de la zona de carga.

Para obtener las frecuencias naturales de fallo de un rodamiento, es necesario conocer la relación entre los distintos elementos rotatorios dentro de un rodamiento, así como sus velocidades relativas. En la ilustración 4 podemos observar los elementos rotatorios de un rodamiento (en este caso de bolas) tanto en una vista frontal, como transversal [3].

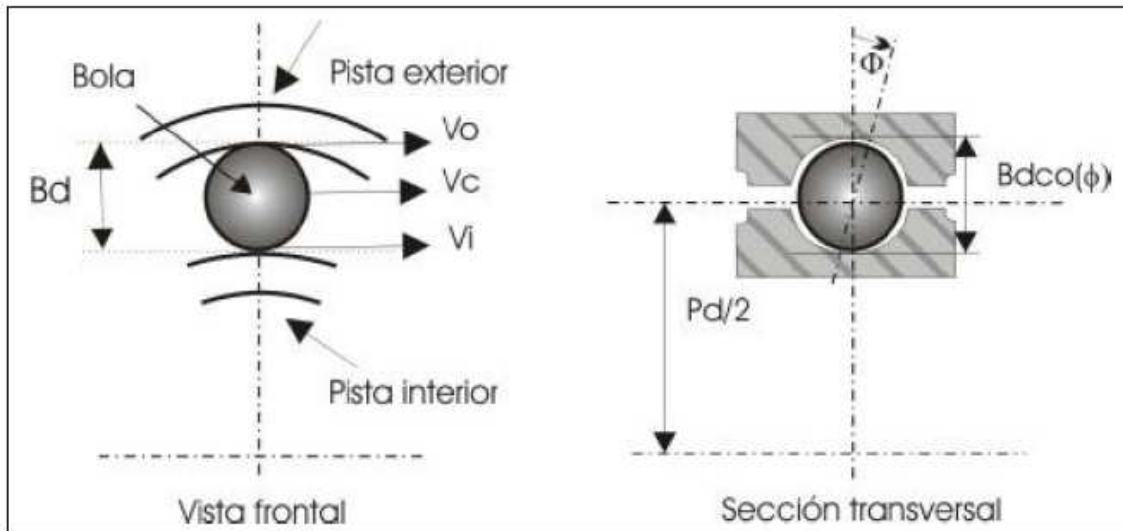


Ilustración 4 Vista frontal y transversal de un rodamiento de bolas [3]

En la ilustración 4 se pueden observar los siguientes parámetros:

V_o : Velocidad de la pista externa.

V_c : Velocidad de la bola.

V_i : Velocidad de la pista interna.

Bd : Diámetro de la bola o rodillo.

Pd : Diámetro efectivo del rodamiento.

Φ : Ángulo de contacto medido desde la línea central de la bola al eje del rodamiento.

2.3.1 FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL TREN DE ELEMENTOS (FTF)

Esta frecuencia fundamental del tren de elementos, representa la frecuencia de giro de la jaula. Para su cálculo, empezaremos calculando la velocidad lineal de cada bola tomada desde su centro, mediante la ecuación (4):

$$v_c = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (4)$$

Por otro lado, La velocidad angular ω es definida como la velocidad lineal v dividida por el radio r , tal y como muestra la ecuación (5):

$$w = \frac{v}{r} \quad (5)$$

Por lo que:

$$w_c = \frac{(v_i + v_o) / 2}{P_d / 2} \quad (6)$$

Donde w_c es la velocidad angular del centro de la bola y también de la jaula.

De este modo w_c puede ser expresada de la manera:

$$w_c = \frac{\left[w_i \left(\frac{P_d}{2} - \frac{Bd \cos \phi}{2} \right) + w_o \left(\frac{P_d}{2} + \frac{Bd \cos \phi}{2} \right) \right]}{P_d} = \frac{w_i}{2} - \frac{w_i B_d \cos \phi}{2 P_d} + \frac{w_o}{2} + \frac{w_o B_d \cos \phi}{2 P_d}$$

Por lo que finalmente:

$$FTF = w_c = \frac{1}{2} \left[w_i \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{P_d} \right) + w_o \left(1 + \frac{Bd \cos \phi}{P_d} \right) \right] \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

De donde:

W_i : velocidad angular de la pista interior del rodamiento.

W_o : velocidad angular de la pista exterior del rodamiento.

2.3.2 FRECUENCIA DE PASO DE LAS BOLAS POR LA PISTA EXTERIOR (BPFO)

Esta frecuencia representa un defecto localizado en la pista exterior, aunque su definición es la frecuencia de las bolas pasando sobre un punto de la pista exterior del rodamiento.

Podemos describirla como el número de bolas multiplicado por la velocidad angular relativa entre la pista exterior y la bola, tal y como se muestra en la ecuación (8):

$$BPFO = N_b |w_c - w_o| \quad [\text{Hz}] \quad (8)$$

Reemplazando los términos de velocidad angular por las expresiones estudiadas anteriormente obtenemos que:

$$\begin{aligned} BPFO &= \left| N_b \left(\frac{1}{2} \left[w_i \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) + w_o \left(1 + \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \right] - w_o \right) \right| = \\ &= \left| N_b \left(\frac{w_i}{2} - \frac{w_i Bd \cos \phi}{2Pd} + \frac{w_o}{2} + \frac{w_o Bd \cos \phi}{2Pd} - w_o \right) \right| = \left| N_b \left[\left(\frac{w_i - w_o}{2} \right) - \left(\frac{w_i - w_o}{2} \right) \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right] \right| \end{aligned}$$

Ahora, si factorizamos nos queda:

$$BPFO = \left| \frac{N_b}{2} \left[(w_i - w_o) \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \right] \right| \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

De donde N_b es el número de bolas del rodamiento.

2.3.3 FRECUENCIA DE PASO DE LAS BOLAS POR LA PISTA INTERIOR (BPFI)

La frecuencia de paso de las bolas por la pista interior representa un defecto localizado en la pista interior.

Podemos expresar la BPFI como el número de bolas multiplicado por la velocidad angular relativa entre la pista interior del rodamiento y el centro de la bola, tal y como muestra la ecuación (10):

$$BPFI = N_b |w_i - w_c| \quad [\text{Hz}] \quad (10)$$

Esta expresión puede reescribirse haciendo uso de las fórmulas estudiadas anteriormente, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 BPFI &= \left| N_b \left(w_i - \frac{1}{2} \left[w_i \left(1 - \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) + w_o \left(1 + \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \right] \right) \right| = \\
 &= \left| N_b \left(w_i - \frac{w_i}{2} + \frac{w_i B_d \cos \phi}{2 P_d} - \frac{w_o}{2} - \frac{w_o B_d \cos \phi}{2 P_d} \right) \right| = \left| N_b \left[\left(\frac{w_i - w_o}{2} \right) + \left(\frac{w_i - w_o}{2} \right) \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right] \right| \\
 BPFI &= \left| \frac{N_b}{2} \left[(w_i - w_o) \left(1 + \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \right] \right| \quad [\text{Hz}] \quad (11)
 \end{aligned}$$

2.3.4 FRECUENCIA DE GIRO DE LAS BOLAS (BSF)

Es la velocidad angular de un elemento rodante (bola) sobre su eje y representa un defecto localizado en una o varias de las bolas del rodamiento.

Esta frecuencia puede ser expresada como la velocidad lineal de un punto de la pista interior en contacto con la superficie de la bola.

$$v_b = (w_i - w_c) \cdot r_i \quad (12)$$

Donde r_i es el radio de la pista interior del rodamiento.

La frecuencia de giro de la bola BSF, puede ser escrita entonces mediante la ecuación (13):

$$BSF = \frac{v_b}{r_b} = \left| (w_i - w_c) \cdot \frac{r_i}{r_b} \right| \quad [\text{Hz}] \quad (13)$$

De donde r_b es el radio de la bola y que mediante relaciones geométricas podemos transformar en:

$$BSF = \left| (w_i - w_c) \left[\frac{(P_d - B_d \cos \phi) / 2}{\frac{B_d}{2}} \right] \right| \quad (14)$$

La ecuación (14) también puede expresarse de la siguiente manera:

$$BSF = \left| \left(w_i - \frac{1}{2} \left[w_i \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) + w_o \left(1 + \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \right] \right) \left(\frac{Pd - Bd \cos \phi}{Bd} \right) \right| \quad (15)$$

Si ordenamos convenientemente la expresión (15), resulta:

$$BSF = \left| \frac{Pd}{2Bd} (w_i - w_o) \left[1 - \frac{(Bd^2 \cos^2 \phi)}{Pd^2} \right] \right| \quad [\text{Hz}] \quad (16)$$

2.4 RESUMEN DE FRECUENCIAS NATURALES DE FALLO EN UN RODAMIENTO

Las ecuaciones (7), (9), (11) y (16) son fórmulas generales en donde las dos pistas del rodamiento pueden estar girando a velocidades distintas entre sí. También el ángulo de contacto de las bolas puede tomar el valor cero.

Si particularizamos para el caso en el que la pista exterior del rodamiento esta en reposo y la pista interna rotando a la velocidad del eje, esto es:

$$w_o = 0 \quad (17)$$

$$w_i = \frac{RPM}{60} \quad (18)$$

Obtenemos las ecuaciones simplificadas (19), (20), (21) y (22) :

$$FTF = \frac{RPM}{60} \left(\frac{1}{2} \right) \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad [\text{Hz}] \quad (19)$$

$$BPFI = \frac{RPM}{60} \left(\frac{Nb}{2} \right) \left(1 + \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad [\text{Hz}] \quad (20)$$

$$BPFO = \frac{RPM}{60} \left(\frac{Nb}{2} \right) \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad [Hz] \quad (21)$$

$$BSF = \frac{RPM}{60} \left(\frac{Pd}{2Bd} \right) \left(1 - \frac{(Bd^2 \cos^2 \phi)}{Pd^2} \right) \quad [Hz] \quad (22)$$

Todas estas fórmulas están basadas en condiciones ideales, es decir, se supone que se produce un contacto puntual entre los distintos elementos rodantes. Es posible, sin embargo, que exista un cierto error al comparar estos valores con los que se obtendrán realmente en posteriores desarrollos de este proyecto. Esto es debido al desplazamiento de las superficies y a la pérdida de contacto entre las bolas y las pistas.

Las fórmulas para determinar las diferentes frecuencias naturales de fallo generadas por los rodamientos y presentadas en esta sección fueron desarrolladas por Thomas D. Millar y Harvey L. Bladerstron en [3].

2.5 MODELO DE VIBRACIÓN PARA UN RODAMIENTO CON DEFECTO LOCALIZADO

En esta sección pasaremos a analizar un modelo para conocer cómo serán las señales de vibración de un rodamiento con defecto localizado en el tiempo. Esto nos servirá para tener una visión previa del tipo de señal que esperamos obtener. Aunque existen multitud de modelos para simular una señal de vibración, en este proyecto, se presentará un modelo detallado. Este modelo considera el sistema de un grado de libertad con amortiguamiento, cuya respuesta es una función impulso [4].

2.5.1 CONSIDERACIONES PARA EL MODELO

Para un rodamiento que presenta un defecto localizado, la vibración que se produce en el caso de que la velocidad de giro sea constante, es un impulso periódico, que es función de la geometría, velocidad y de la zona de localización del defecto [5].

La vibración que se genera puede estar en tres rangos de frecuencias:

- Frecuencias intermedias (1-10 KHz). Estas vibraciones estimulan las frecuencias resonantes de la estructura del rodamiento.
- Frecuencias bajas (por debajo de los 500 Hz).
- Frecuencias altas (30KHz.-100 KHz).

La bola, al pasar por un defecto, genera una onda de esfuerzo o impacto. Muchos estudios han demostrado que el primer síntoma que presentan los rodamientos cuando se generan ciertos tipos de defectos incipientes tales como grietas, hendiduras, rebordes y picaduras, es una vibración con componentes de alta frecuencia, que son consecuencia de la generación de ondas de esfuerzo. Las ondas de esfuerzo son de naturaleza mecánica, esto implica que se propagan y transmite en medios deformables o elásticos. Este tipo de ondas se caracterizan por ser transitorias y de corta duración y se producen en un amplio rango de frecuencias, desde 1kHz hasta incluso superar los 50kHz. Principalmente son originadas por el contacto metal-metal y su velocidad de propagación es independiente de la velocidad de rotación de la máquina [6].

Un claro ejemplo de defectos en rodamientos que generan este tipo de ondas son las grietas. Estas pueden estar producidas por fatiga en los rodamientos, fricción entre superficies y desgaste abrasivo, como estudiaremos más en profundidad a continuación en este proyecto.

2.5.2 DESARROLLO DEL MODELO

Las ondas de esfuerzo se generan cuándo un elemento rodante pasa sobre un defecto, si la velocidad de giro es constante, estos impactos se generarán periódicamente. Como consecuencia de estos pulsos la frecuencia natural del rodamiento es excitada. La duración de cada pulso depende del factor de amortiguamiento del sistema [5].

Un modelo simplificado para la simulación de estos pulsos es un sistema: lineal, discreto y sub-amortiguado, con un sólo un modo de vibración dominante después de

cada impacto y con las bolas como elementos de rigidez [5]. Este modelo se puede observar en la ilustración 5:

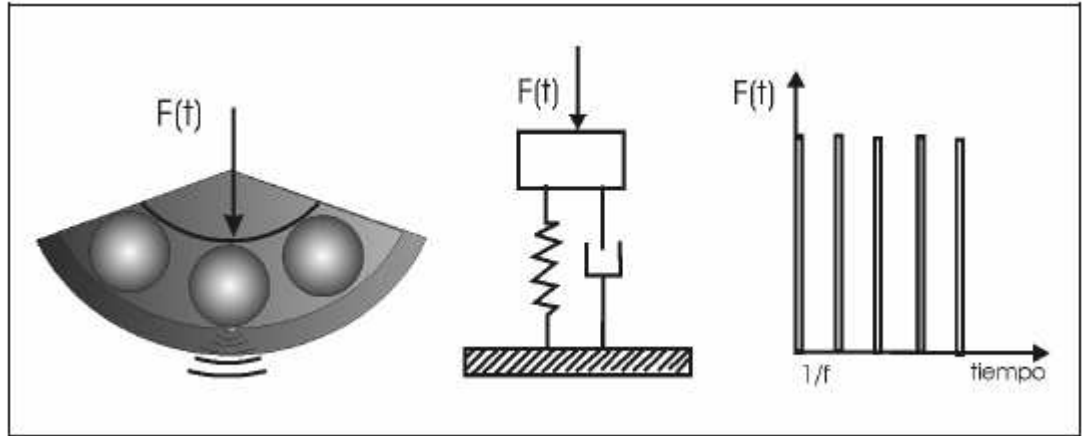


Ilustración 5 Modelo de rodamiento excitado por un defecto localizado en pista externa [5]

La ecuación de este sistema es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (23)$$

La respuesta de este sistema a una función impulso unitario (o función delta de Dirac) se muestra en la ecuación (24) [7]:

$$h(t) = \frac{e^{-\xi w_n t}}{m w_d} \text{sen}(w_d t) \quad (24)$$

Donde:

ξ : Factor de amortiguamiento.

w_n : Frecuencia natural para vibración libre.

w_d : Frecuencia de resonancia para sistema amortiguado.

m : Masa del sistema rodamiento-eje.

La ecuación (24) puede ser reescrita como:

$$h(t) = \alpha(t) e^{-\zeta w_n t} \text{sen}(w_d t) \quad (25)$$

Esta expresión corresponde a la respuesta ante un impulso unitario, en donde $\alpha(t)$ es la función que se relaciona con el punto de ubicación del defecto y ζw_n es el factor de decaimiento del sistema. Esta función es de carácter periódico dependiendo de la función $\alpha(t)$ [6].

Ubicación del defecto	Propiedades de $\alpha(t)$
Pista externa	Función no periódica de amplitud constante a_0
Pista interna	Función de amplitud máxima a_0 y frecuencia de giro del eje
Bola	Función de amplitud máxima a_0 y frecuencia $2BSF$

Tabla 1 Amplitud y periodicidades de la función $\alpha(t)$ con respecto a la ubicación del defecto

Producto de la rotación del eje a una velocidad constante, estas vibraciones ocurrirán periódicamente con una frecuencia de $1/T$ donde T es el período de separación entre los pulsos. De este modo podemos escribir una función periódica que genera esta sucesión de pulsos, tal y como se refleja en la ecuación (26):

$$d(t) = d_0 \sum_j \delta(t - IT) \quad (26)$$

En el modelo se consideran los impactos como señales impulso, esto ocurre sólo en defectos incipientes, ya que a medida que el defecto crece variará tanto la duración del pulso, como su forma y por tanto la amplitud de su respuesta. Así para un defecto en la pista exterior la salida del sistema vendrá dada por la ecuación (27):

$$x(t) = d(t) * h(t) \quad (27)$$

Para el caso en el que tengamos defectos en la pista interior o en las bolas, se debe agregar a la función $d(t)$ un factor que considere la magnitud, ubicación del defecto y dirección de la carga, ya que al existir un desplazamiento angular relativo entre la distribución de carga y el defecto a medida que gira el rodamiento, la amplitud del pulso variará. Este factor nos da información de cómo la fuerza de los pulsos variará cuando el defecto se mueve dentro y fuera de la zona de carga [6].

Para una carga radial este factor es el expresado en la ecuación (28):

$$B(t) = \max \left(\left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos \theta) \right], 0 \right)^{\frac{3}{2}} \quad (28)$$

La ecuación (28) se conoce con el nombre ecuación de Stribeck [6] y es la distribución aproximada de carga para un rodamiento de bolas bajo carga radial.

En donde:

ε : es el factor de distribución de carga el cual puede variar entre 0 y 1.

θ : es el ángulo de variación de la zona de carga, que puede apreciarse en la ilustración 6.

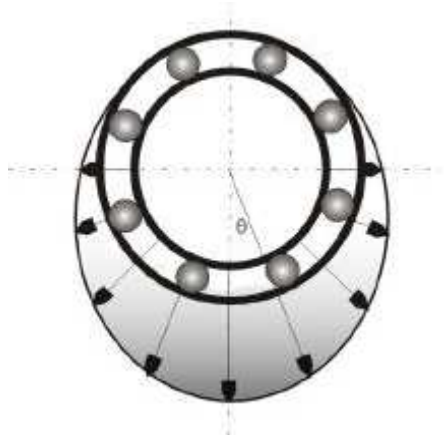


Ilustración 6 Distribución de carga radial para un rodamiento [6]

De la ecuación (28) se observa la dependencia de la carga a la que son sometidos los elementos rodantes con respecto a la posición angular de éstos. A continuación, en la tabla 2 [6], se presenta la casuística que se presenta para los dos tipos de carga que se pueden presentar en un rodamiento.

Carga	Ubicación del defecto		
	Pista externa	Pista Interna	Elemento rodante
Estática	Sin periodicidad	Frecuencia de giro del eje	FTF
Dinámica	Frecuencia de giro del eje	Sin periodicidad	Frecuencia de giro del eje-FTF

Tabla 2 Frecuencias de variación de los pulsos [6]

De las consideraciones anteriores se tiene que la señal vibratoria es:

$$x(t) = d(t) * h(t) * B(t) \quad (29)$$

Por último, para considerar el defecto localizado en la bola o el elemento rodante, se debe agregar otro factor a la ecuación, que simula alternancia de los golpes producto del defecto, ya que en algún segundo golpeará la pista interna y en otro la pista externa. De esta consideración la señal vibratoria será la mostrada en la ecuación (30):

$$x(t) = \left\langle \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i B(t) \delta(t) \right\rangle * h(t) \quad (30)$$

Para calcular la aceleración derivaríamos esta expresión dos veces.

2.6 FACTORES CAUSANTES DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS.

El principal causante de defectos en rodamientos es el fenómeno de fatiga. Sin embargo, existen otros muchos factores que afectan a la vida nominal del rodamiento, tal y como se aprecia en la ilustración 7, facilitada por el fabricante SKF [4].

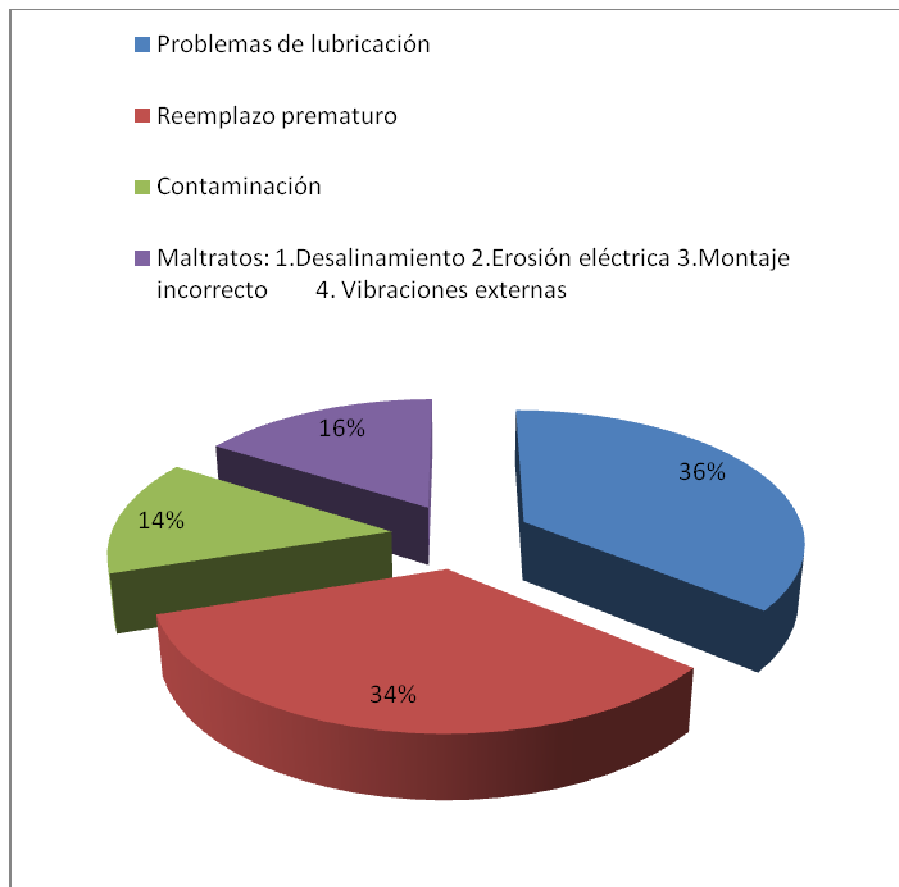


Ilustración 7 Factores que provocan defectos en rodamientos

A continuación se procederá a describir estos factores que ocasionan daño en los elementos del rodamiento y el tipo de daños que se puede esperar.

- Problemas de lubricación

Cerca del 36% de los fallos prematuros de todos los rodamientos son causados por especificaciones y aplicaciones incorrectas de los lubricantes. Inevitablemente, cualquier rodamiento sin una correcta lubricación fallará antes de su vida nominal de servicio. Los rodamientos son a menudo uno de los componentes de más difícil acceso



en la maquinaria, por ello, una lubricación inadecuada supone habitualmente problemas complejos.

La grasa presenta la ventaja, con respecto al aceite, de que es más fácil de retener, ya que ésta se aloja en la jaula y lubrica continuamente al rodamiento. Esto hace que en muchos casos se pueda prescindir de retenes, destinados a contener el lubricante en el interior del rodamiento. Aún así, la grasa se debe colocar en el rodamiento con cuidado, ya que un exceso de ella provoca un rápido aumento de la temperatura de funcionamiento, en especial cuando giran a gran velocidad. Una regla es que el rodamiento debe estar lleno de grasa entre un tercio y un medio del volumen total libre del rodamiento, en el caso del aceite, este debe llenar hasta la mitad del elemento rodante más inferior.

- Montaje incorrecto

Alrededor del 16% de todos los fallos prematuros de los rodamientos son causados por montajes deficientes o inadecuados (normalmente por el uso de la fuerza bruta...). Se ignora a menudo, la disponibilidad de las herramientas correctas para el montaje.

- Desalineamiento

El desalineamiento produce una pequeña sobrecarga que puede ocasionar la ruptura de la película de aceite con el consiguiente riesgo de la falta de lubricación en la zona de carga. En general, cualquier sobrecarga por desalineamiento reduce la vida útil de un rodamiento.

- Desequilibrio

Todos los elementos rotativos son siempre fuentes potenciales de vibraciones mecánicas. El desequilibrio en la distribución de la masa es una de las causas más frecuentes ya que, únicamente cuando el eje de giro coincida con el de gravedad, las fuerzas de inercia no producirán ninguna acción centrífuga perturbadora en los rodamientos. En el mundo real esto es imposible de conseguir por muy estrictas que sean las tolerancias de fabricación. Por tanto, siempre tendremos presente un cierto grado de desequilibrio en máquinas rotativas. El criterio para establecer el desequilibrio

residual permisible es una solución de compromiso entre el coste y la responsabilidad de la aplicación del rodamiento.

- La corrosión

Es un proceso químico que experimentan la mayoría de los metales y que conlleva su deterioro. Este proceso puede ocurrir con el simple contacto entre el metal y la atmósfera o cuando se produce la interacción entre el metal y un medio líquido rico en oxígeno y ácidos. La práctica totalidad de los materiales metálicos empleados en la industria sufren este proceso. Por este motivo es una variable más importante la velocidad con la que ocurre este proceso, que el simple hecho de que el proceso tenga lugar. La velocidad, será la variable principal a controlar en los procesos de corrosión ya que nos determinará la vida útil del rodamiento frente a corrosión.



Ilustración 8 Rodamiento con corrosión

- La contaminación

Un rodamiento es un componente de precisión que no funcionará correctamente a no ser que esté bien lubricado y aislado de toda contaminación. Ya que los rodamientos lubricados de por vida con grasa (obturados) constituyen sólo una pequeña proporción de todos los rodamientos en uso, al menos el 14% de todos los fallos prematuros son atribuibles a problemas causados por contaminación. En este ámbito, entran en juego los obturadores para los entornos de trabajo más duros.

2.7 TIPOS DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS.

Los tipos más significativos de daños que podemos encontrarnos en rodamientos son:

- Desgaste

La presencia de partículas abrasivas, problemas de lubricación y problemas de vibración, pueden provocar un serio desgaste en el rodamiento. En la ilustración 9 puede observarse un rodamiento con este tipo de daño.

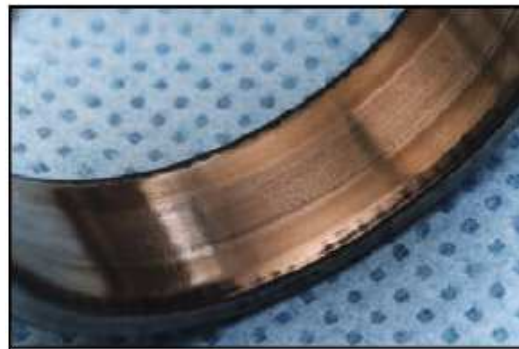


Ilustración 9 Rodamiento con desgaste producido por partículas abrasivas

En la tabla 3 encontramos un resumen de los tipos de desgaste que podemos encontrar, así como la solución a implementar para evitarlo.

Tipo de desgaste	Descripción	Causa	Acción correctiva
Por partículas abrasivas	Pequeñas indentaciones alrededor de las pistas y bolas.	.Malas condiciones de limpieza durante el montaje. Sellado imperfecto. Lubricante contaminado por partículas abrasivas.	No sacar rodamiento de su embase protector hasta el momento de montaje. Verificar sellado y utilizar lubricante en buenas condiciones.
Por problemas de lubricación	La superficie tiene apariencia de espejo. En la fase final decoloración café azulado .	Falta de lubricante o lubricante en mal estado (ha perdido sus propiedades).	Chequear correcta lubricación del rodamiento y usar lubricante en buen estado.
Por problemas de vibración	Marcas en las pistas. Rectangulares para rodamientos de rodillos y circulares en rodamientos de bolas.	Rodamiento sometido a vibración externa.	Asegurar una precarga radial al rodamiento en su transporte. Aislar el rodamiento de vibraciones. Usar método de lubricación continua. En este aspecto son mejores los rodamientos de bolas (usar preferentemente).

Tabla 3 Tipos de desgaste: descripción, causas y acción correctiva [8]

En las ilustraciones 10 y 11 se muestran algunos ejemplos muy ilustrativos de los tipos de desgaste descritos anteriormente.



Ilustración 10 Rodamiento con desgaste producido por problemas de lubricación



Ilustración 11 Rodamientos con desgaste producido por problemas de vibración para rodamiento de rodillos y bolas respectivamente

- **Indentación:**

Se produce en las pistas y/o elementos rodantes, cuando el montaje se realiza con elevada fuerza aplicada de manera brusca o seca (martillazos). En la ilustración 12 se observan los daños producidos por este tipo de indentación. Estos defectos se transmiten hacia los elementos rodantes pudiéndose producir incrementos de presión considerables en las zonas de contacto elemento rodante-pista. Las partículas abrasivas también pueden causar indentación [8], tal y como puede observarse en la ilustración 13.

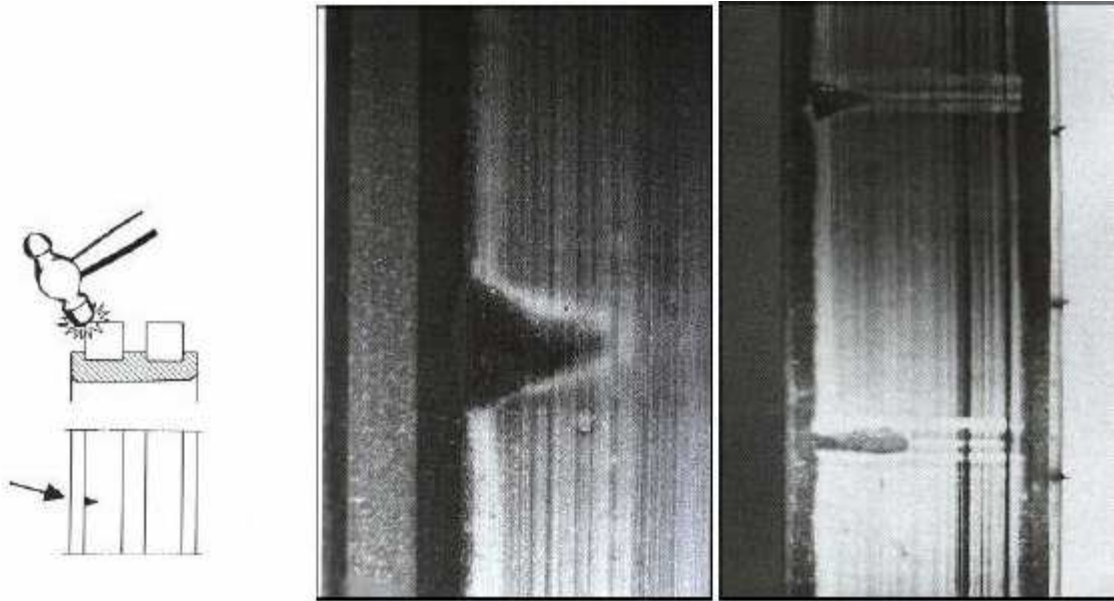


Ilustración 12 Rodamiento con indentación debida a montaje inapropiado



Ilustración 13 Rodamiento con indentación debida a partícula abrasiva.

- Flaking o descascarillado:

Como ya se comentó en el desarrollo de este marco teórico, los rodamientos, tienen una vida útil que está determinada por una serie de variables como la velocidad de giro y la carga a la que están sometidos. Transcurrido este tiempo, se producirá un fallo debido a la fatiga del material.

El fenómeno de fatiga está producido por tensiones de carácter cíclico en la superficie de rodadura de la zona de carga del rodamiento. En un momento determinado, estas tensiones cíclicas, originan una micro fisura, que, posteriormente, se va propagando gradualmente con el número de ciclos hacia el exterior de la superficie.

Los elementos rodantes del rodamiento, pasan sobre este defecto y contribuyen a que la fisura sea cada vez mayor. Este fenómeno se conoce como flaking [9] o spalling y se muestra en la ilustración 14.

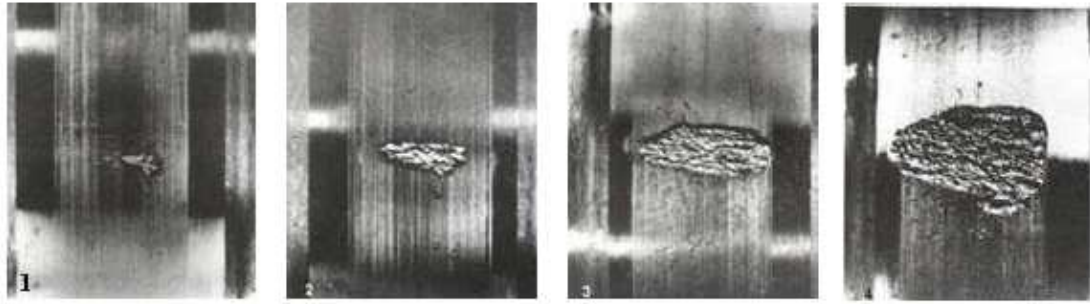


Ilustración 14 Secuencia del *fenómeno flaking*.

- Smearings:

Se produce cuando dos superficies, lubricadas incorrectamente, deslizan la una sobre la otra, en condiciones de elevada carga. En este caso, se originan micro-soldaduras produciéndose transferencia de material (ver ilustración 15). Cuando este fenómeno ocurre se alcanzan elevadas temperaturas que provocan concentraciones de tensión que pueden dar lugar a grietas o al desconchado del material del rodamiento.

Para evitar la aparición de este fenómeno deben utilizarse métodos adecuados de lubricación, para asegurar la existencia de una capa de lubricante continua y extendida sobre toda la pista de rodadura [8].



Ilustración 15 Rodamiento con Smearing en su pista exterior.

- Superficies deformadas:

Cuando la película de lubricante entre las pistas y los elementos rodantes es demasiado delgada, los salientes de las superficies rugosas estarán en contacto (ver ilustración 16). A causa de esta interacción se producirán pequeñas grietas en las superficies de rodadura, que en ningún caso deben ser confundidas con la grieta que origina la fatiga clásica del material. Estas grietas que originan las superficies deformadas, son, en general, de pequeño tamaño y superficiales pudiendo llegar a ocasionar la incorrecta rodadura de la bola [8].

Si la lubricación del rodamiento es adecuada no debemos temer la aparición de defectos debidos a superficies deformadas.

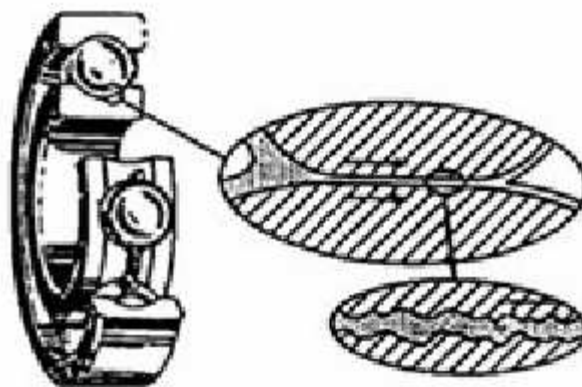


Ilustración 16 Superficies de contacto en un rodamiento.

2.8 PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.

El objetivo fundamental del procesamiento de señales, en el presente proyecto fin de carrera, es extraer parámetros o funciones característicos del modelo, que nos sirvan para clasificar, monitorizar y diagnosticar, distintos tipos de sistemas.

El procesamiento de la señal, se lleva a cabo a menudo para analizar el comportamiento de sistemas tales como máquinas, estructuras., etc. Al ser excitadas mediante distintas señales, tal y como se muestra en la ilustración 17.

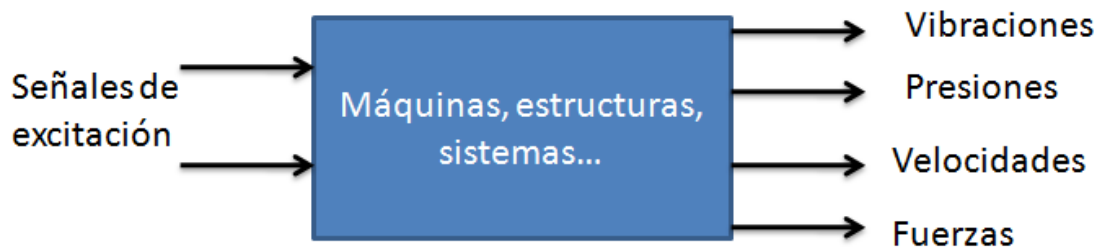


Ilustración 17 Modelo de sistema excitado

Esta sección se dedicará al estudio de las diferentes técnicas de procesamiento de la señal, para conseguir obtener información representativa de las señales de vibración de rodamientos. Estas técnicas pueden agruparse en las que trabajan en el dominio de la frecuencia, en el dominio temporal o las técnicas que utilizan ambos dominios. Para la mejor comprensión del desarrollo de este proyecto, se explicarán a continuación aquellas relacionadas con el dominio de la frecuencia.

2.8.1 EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

El uso del dominio de la frecuencia en muchas áreas de aplicación se basa en un conjunto de razones entre las que destacan las siguientes [10]:

- El significado físico es a menudo más fácil de obtener en el dominio de la frecuencia que en el dominio del tiempo en la descripción de señales y sistemas.

- Los patrones significativos de la señal son, a menudo, más fáciles de reconocer. Pequeños cambios en la señal, son reconocidos mejor en la representación del dominio de la frecuencia.
- Los sistemas mecánicos se modelan frecuentemente mediante un sistema lineal, descrito por ecuaciones diferenciales lineales. Mediante el uso de la transformada de Fourier, podemos convertir estas ecuaciones en algebraicas.

El análisis clásico de señal en el dominio de la frecuencia es la descomposición en series de Fourier.

2. 8.2 LA TRANSFORMADA DE FOURIER.

La Transformada de Fourier (FT) es una herramienta matemática que nos ayuda a describir el comportamiento de funciones no periódicas. Su objetivo es la descomposición de la función en una suma de funciones armónicas [10].

La definición de esta transformada viene dada por las ecuaciones (29) y (30):

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(j2\pi kf) df \quad (29)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi kft) dt \quad (30)$$

De manera simbólica podemos decir que:

$$x(t) \leftrightarrow X(f) \quad (31)$$

$X(f)$ es la transformada de Fourier de $x(t)$. Siendo $x(t)$ la representación de la señal en el dominio del tiempo y $X(f)$ en el dominio de la frecuencia.

En la ilustración 18 podemos observar las dos representaciones mencionadas anteriormente para distintas señales. Las dos primeras señales son sinusoidales, la frecuencia de la segunda es superior a la de la primera, como se puede observar en el análisis en frecuencia. La tercera señal es la suma de las dos primeras y tras aplicar la transformada de Fourier se observan las frecuencias de ambos armónicos.

Cuando tratamos con señales complejas compuestas por gran cantidad de armónicos, el análisis en el dominio de la frecuencia nos permite distinguir las frecuencias de los armónicos principales, labor que sería casi imposible si sólo dispusiéramos del análisis temporal.

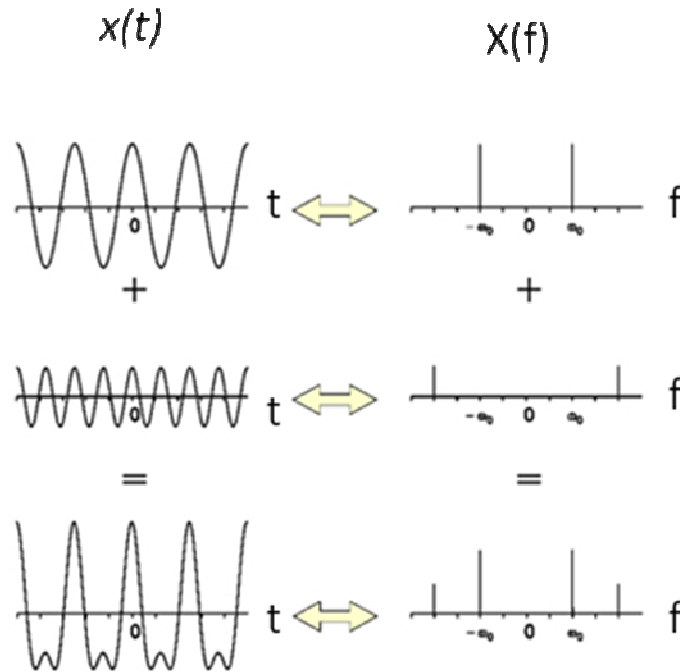


Ilustración 18 Análisis tiempo frecuencia de varias señales

2. 8.3 SHORT TIME FOURIER TRANSFORM (STFT)

El uso de la transformada de Fourier a la hora de analizar señales no estacionarias plantea un problema. Puesto que casi todas las señales que se generan en la industria tienen este carácter no estacionario, este inconveniente adquiere una especial relevancia. Este problema radica en que nuestro espectro de frecuencias puede no ser el mismo para distintos instantes de tiempo, como es lógico pensar de una señal no estacionaria. Nos encontraríamos por tanto ante la existencia de numerosos espectros de frecuencia distintos dentro de una misma señal [10].

Por tanto, si representamos la señal en el dominio de la frecuencia, no estaremos obteniendo información fidedigna de la misma. De este modo, surge la idea de la STFT.

Esta nueva transformada pretende considerar la señal no estacionaria como un conjunto de señales adyacentes, que puedan ser consideradas como cuasi estacionarias.

Se considerará un intervalo de tiempo, dividiendo la señal en una serie de señales de este periodo, como si se tratase de una ventana de tiempo que se desliza a lo largo de la señal original. Posteriormente se aplicará la FT a cada uno de estos intervalos, tal y como se muestra en la ecuación (32):

$$S_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)h(u-t)\exp(-j2\pi ft)du \quad (32)$$

Donde $x(t)$ es la señal a analizar y $h(u-t)$ la ventana de tiempo que se translada a lo largo de la señal. La ecuación (32) se conoce como “short time Fourier transform” (STFT).

El inconveniente de la STFT es que tiene una resolución prefijada por el tamaño del intervalo, o lo que es lo mismo, el tamaño de la “ventana temporal deslizante” escogida. Si éste tiene una longitud infinita obtendremos una representación en frecuencia perfecta, a costa de perder toda la información temporal (caso de la transformada de Fourier). Conforme el intervalo se hace menor se obtiene información en el dominio temporal, a costa de perder información en frecuencia.

Este hecho se debe al principio de incertidumbre de Heisenberg, que postula lo siguiente:

“No se puede determinar, simultáneamente y con precisión arbitraria, ciertos pares de variables físicas, como son, por ejemplo, la posición y el momento lineal (cantidad de movimiento) de un objeto dado. En otras palabras, cuanto mayor certeza se busca en determinar la posición de una partícula, menos se conoce su cantidad de movimiento lineal y, por tanto, su velocidad” [11].

Este principio puede aplicarse al caso que se estudia en este proyecto, llegando a la conclusión de que no puede determinarse con exactitud en un cierto punto la información en el dominio temporal y en el de la frecuencia.

El módulo de la STFT elevado al cuadrado se denomina espectrograma (ecuación (33)).

$$E(t, f) = |S_x(t, f)|^2 \quad (33)$$

El espectrograma, puede ser representado en 3D (representación en cascada) o en 2D. Esta representación, tiene las mismas limitaciones que la STFT, en cuanto a lo que el principio de incertidumbre se refiere.

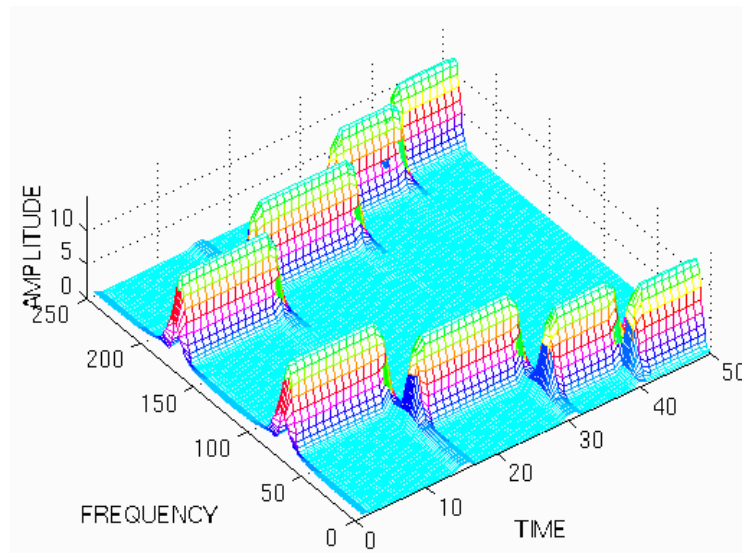


Ilustración 19 Espectrograma 3D con intervalos temporales pequeños

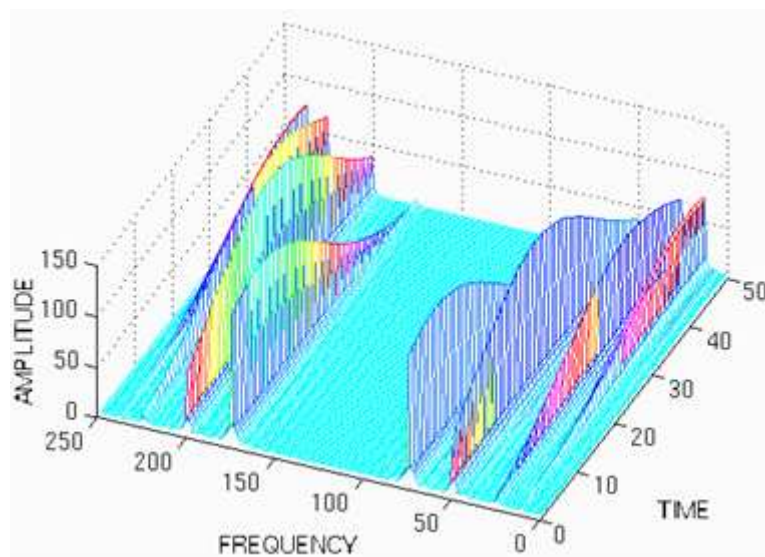


Ilustración 20 Espectrograma 3D con intervalos temporales grandes

En las ilustraciones 19 y 20, se tiene una representación en 3D del espectrograma de una señal. En ellas se observa como a medida que el intervalo temporal se hace más pequeño, se obtiene información más precisa en el dominio temporal a costa de perder precisión en el dominio de la frecuencia y viceversa.

2.8.4 TRANSFORMADA DE HILBERT

Para superar las limitaciones impuestas por la FT y la STFT, surge la necesidad de encontrar un método para el análisis frecuencial de señales no lineales y no estacionarias. Es en este ámbito donde entra en juego la Transformada de Hilbert, que se muestra como una herramienta muy potente para estudiar este tipo de señales.

La expresión analítica de la Transformada de Hilbert se viene dada por la ecuación (34) [10]:

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (34)$$

En la ilustración 21 podemos observar un ejemplo de aplicación de la transformada de Hilbert a una señal $x(t)$ cuadrada de 2 segundos de periodo.

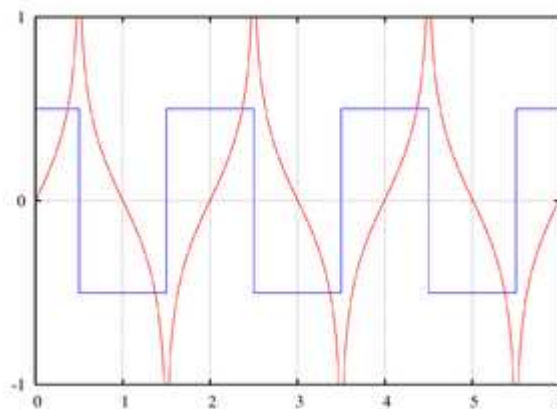


Ilustración 21 Transformada de Hilbert de una onda cuadrada

En el marco del presente proyecto, se puede entender y ver la utilidad de esta Transformada, ya que ésta nos permite obtener la envolvente de la respuesta de nuestro sistema, utilizándola así, a modo de filtro, para posteriormente aplicarle a la señal filtrada la Transformada Rápida de Fourier (función de Matlab[®] que, permite un ahorro computacional importante a la hora de calcular la Transformada de Fourier discreta).

2.9 FUNDAMENTOS DE LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es una disciplina matemática que cada vez cuenta con más seguidores. Se basa en la idea de que, en un instante determinado, no es posible precisar el valor concreto de una variable, si no tan solo conocer su grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos en los que se ha dividido el rango de variación de la variable [12].

Esta técnica es muy potente para tratar con información imprecisa, como puede ser temperatura baja o estatura media. Esta información se divide en conjuntos borrosos que se combinan mediante reglas para definir acciones. Los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada, definidas en términos de conjuntos borrosos, por medio de una serie de reglas que producen uno o varios valores de salida [12].

Todas estas bondades hacen que la lógica difusa sea empleada en numerosos ámbitos en la industria. En el siguiente cuadro se recogen las principales aplicaciones en los distintos sectores industriales.

Productos al consumidor	Sistemas	Software
Lavadoras	Ascensores y elevadores	Diagnóstico Médico
Hornos microondas	Trenes	Seguridad
Cámaras de video	transmisiones	Compresión de datos
Televisores	frenos	
Sistemas térmicos	controles de tráfico	
Traductores	Máquinas mecánicas	

Tabla 4 Principales campos de aplicación de la lógica difusa en la industria

En la ilustración 22 podemos observar el esquema de desarrollo tanto de la lógica clásica como de la lógica difusa o borrosa. Mientras que la lógica clásica se centra en el razonamiento exacto, se observa como la lógica difusa se basa en el razonamiento aproximado.

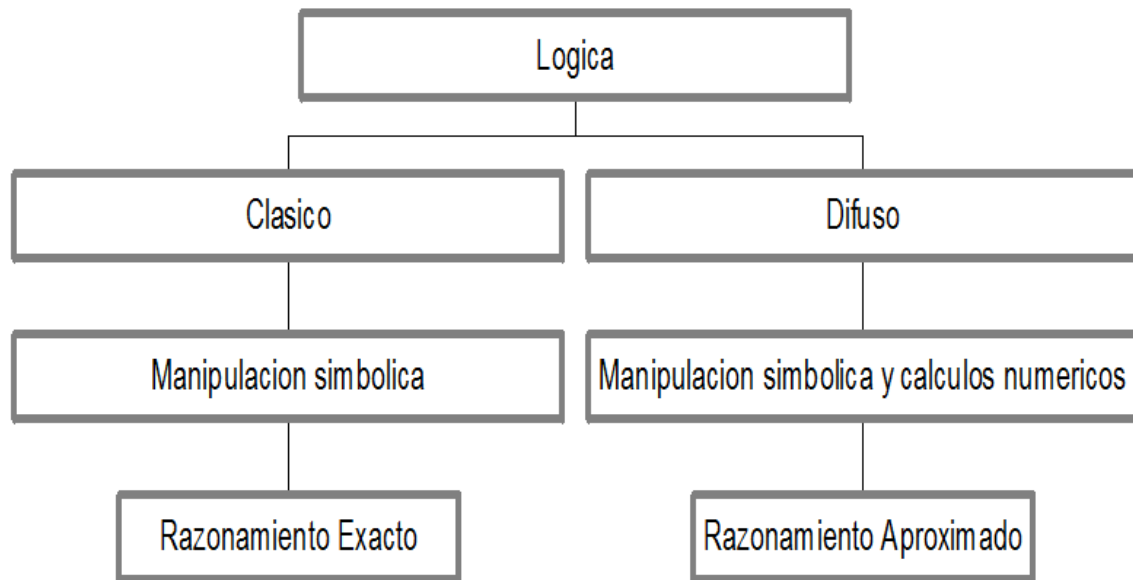


Ilustración 22 Esquema de desarrollo de la lógica difusa en comparación con métodos clásicos [13]

Dentro de la lógica difusa aparece un concepto fundamental para comprender su funcionamiento, este concepto es la difusividad. La difusividad se define como una incertidumbre relacionada con el grado en el que los eventos tienen lugar, sin importar la probabilidad de su ocurrencia. Por ejemplo, el grado de juventud de una persona es un evento difuso sin importar que sea un elemento aleatorio [13].

Las diferencias principales entre difusividad y probabilidad, se encuentran reflejadas en la tabla 5.

Probabilidad vs Difusividad	
Probabilidad	Difusividad
Incertidumbre no determinista	Incertidumbre determinista
La incertidumbre probabilística se disipa con el incremento del número de muestras	La incertidumbre no se disipa con el incremento del número de muestras
Describe los eventos que ocurren	Describe eventos ambiguos

Tabla 5 Probabilidad vs Difusividad [13]



En la ilustración 23, observamos cómo mientras la probabilidad se centra en tratar de explicar la ocurrencia de un hecho aleatorio, la difusividad describe el grado con el cual ocurre este hecho.

2.9.1 CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES DE PERTENENCIA

El primer ejemplo que utilizó Lofti A. Zadeh (Primer ingeniero que investigó la lógica difusa) para ilustrar el concepto de conjunto difuso, fue el de los “hombres altos”. Según postulaba la lógica clásica el conjunto “hombres altos” estaba formado por los hombres que superaban un valor umbral de altura predeterminado. Por ejemplo 180 cm. Todos los hombres por encima de este umbral pertenecían al grupo, quedando así fuera del grupo los hombres que no superaban este valor de altura. Sin embargo, no parece muy lógico decir que un hombre que mide 179 cm no es alto mientras que otro que mide 181 cm si lo es, ya que su altura tan sólo difiere en 2 cm [14].

El enfoque de la lógica difusa defiende que el conjunto “hombres altos” no tiene una frontera clara de pertenencia o no al mismo. Mediante una función se define esa frontera de transferencia de “alto” a “no alto”. Esta función asigna a cada valor de altura un grado de pertenencia al conjunto que varía entre 0 y 1. De esta manera podemos decir que un hombre que mida 179 cm pertenece al conjunto con un grado de 0.8 mientras que un hombre que mide 181 cm pertenece al conjunto con un grado de 0.85.

Como conclusión podríamos decir que la lógica clásica es un caso particular de la lógica difusa, en la que esa función que define la transición es una función escalón, como se puede apreciar en la ilustración 23 [14]:

Como se ha comentado anteriormente la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial, es decir a cada elemento se le asigna un grado de pertenencia al grupo, que puede variar entre 0 y 1. El grado de pertenencia se cuantifica mediante la función de pertenencia o característica.

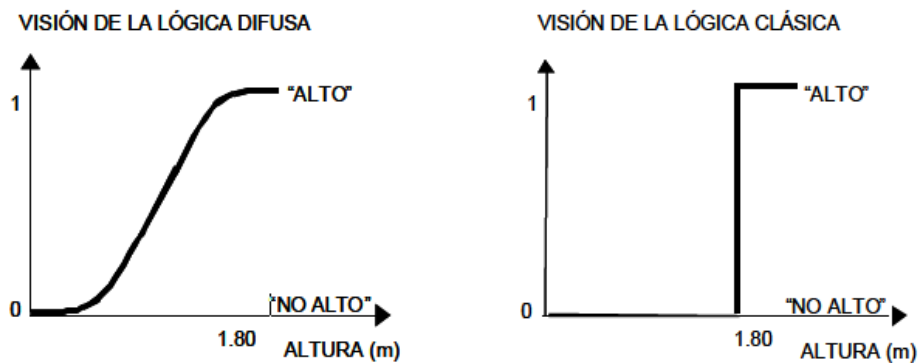


Ilustración 23 Lógica clásica versus lógica difusa

La forma de la función de pertenencia utilizada depende del criterio de resolución de cada problema así como de factores geográficos, cronológicos y del punto de vista de cada usuario. El único requisito que debe reunir una función de pertenencia es que tome valores entre 0 y 1 y que sea continua en ese intervalo. En la ilustración 24, se muestran algunas de las funciones de pertenencia más empleadas.

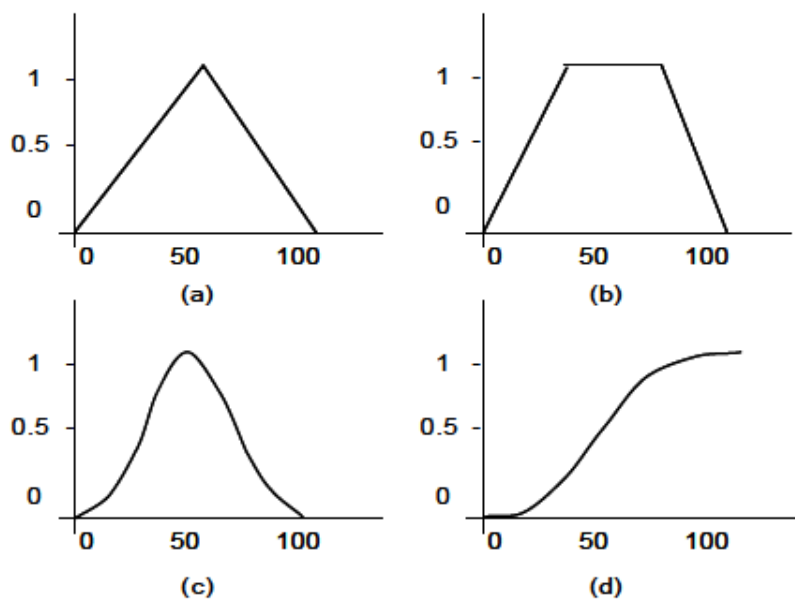


Ilustración 24 Funciones de pertenencia más empleadas: (a) Triangular, (b) Trapezoidal, (c) Gaussiana y (d) Sigmoidal

De forma general, podemos decir que existen dos formas de determinar la función de pertenencia asociada a un conjunto. La primera mediante el conocimiento experto y la segunda está basada en utilizar un conjunto de datos conocidos para determinar la función. Esta segunda aproximación será utilizada en el marco de este proyecto.



El usuario es el encargado de elegir el número de funciones de pertenencia asociadas a una misma variable. Pero se debe tener en cuenta que a mayor número de funciones de pertenencia, mayor complejidad computacional se tendrá. Sin embargo, también se ganará en resolución. Por otro lado se ha de tomar en consideración que estas funciones pueden estar solapadas o no.

El hecho de que varias funciones de pertenencia se encuentren solapadas, refuerza el concepto de la lógica difusa ya que un elemento puede pertenecer con distinto grado a varios conjuntos difusos al mismo tiempo [14].

2.9.2 INFERENCIA DIFUSA

Se denominan reglas difusas al conjunto de proposiciones IF, AND, OR, NOT y THEN, que se utilizan para modelar el problema a resolver. Las reglas se expresan por tanto en términos lingüísticos y las más simples son de la forma:

“Si v es A entonces u es B ”

Donde A y B son distintos conjuntos difusos, v sería un antecedente y u un consecuente. Una regla representa un tipo de relación entre dos conjuntos o, lo que es lo mismo, una implicación lógica entre los mismos.

Para obtener el conjunto de reglas difusas correspondiente a un problema concreto, hay dos caminos a seguir:

- Dejar que los datos establezcan los conjuntos difusos, es decir, ver cómo se relacionan los datos recogidos y establecer los conjuntos y reglas en consecuencia.
- Definir de antemano los conjuntos difusos y luego clasificar los datos en consecuencia.

Para obtener el conjunto de reglas que modelan de forma total un problema concreto, se puede hacer mediante la combinación de todas las reglas que es posible establecer de manera teórica. Así el número de reglas posibles para cada consecuente vendrá dado por la ecuación:

$$P_t = \prod_A A_n \quad n = 1, 2, \dots, p; \quad (35)$$

Donde A_n es el conjunto difuso n y p el número de conjuntos difusos.

Sin embargo aunque formalmente cada consecuente podrá tener P_t reglas difusas, puede haber algunas que no tengan sentido físico y otras que no se ajusten a las particularidades del problema a resolver. Por esos motivos deberemos seleccionar de entre las reglas teóricamente disponibles, el conjunto más adecuado al problema a resolver [12].

2.9.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA.

El diagrama de bloques de un sistema de clasificación basado en lógica difusa se puede observar en la ilustración 25:

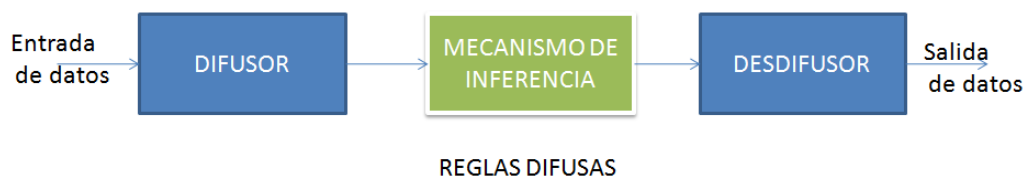


Ilustración 25 Diagrama de bloques de un sistema de control basado en lógica difusa

El sistema de clasificación está compuesto por los siguientes bloques:

- **Bloque difusor:** En este bloque, a cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenecía a cada uno de los conjuntos difusos que se han considerado. Esto se lleva a cabo mediante las funciones de pertenencia que hemos asociado a cada uno de los conjuntos difusos. Las variables



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

de entrada a este bloque son valores concretos de las variables de entrada y las variables de salida son grados de pertenencia a los distintos conjuntos difusos del problema.

- **Bloque de inferencia:** En este bloque, mediante la ayuda de los mecanismos de inferencia, se relacionan los conjuntos difusos de entrada y de salida. Representa a las reglas difusas del sistema. Las variables de entrada a este bloque son conjuntos difusos, o lo que es lo mismo, grados de pertenencia, mientras que las variables de salida son de nuevo conjuntos difusos esta vez asociados a las variables de salida del problema.
- **Bloque desdifusor:** En este bloque, a partir de los conjuntos difusos salientes del mecanismo de inferencia y a partir de los métodos matemáticos de desdifusión, se obtienen valores concretos de las variables de salida.

2.9.4 MECANISMOS DE INFERENCIA.

Los mecanismos de inferencia son aquellos que mediante la utilización de principios de inferencia difusa, relaciona los conjuntos difusos de entrada con los conjuntos difusos de salida.

En el bloque de inferencia se realiza la traducción matemática de las reglas difusas. Como ya se mencionó anteriormente, las reglas más simples para diseñar un sistema de clasificación basado en lógica difusa son del tipo [14]:

“Si v es A entonces u es B ”

El conjunto difuso de salida B , es el resultado de la agregación de todas las reglas que componen la regla base, es decir, de la combinación de los conjuntos difusos resultantes de cada una de las reglas.



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Para procesar las reglas se deben elegir los operadores matemáticos que corresponden a los siguientes operadores lógicos: OR, AND, NOT y ENTONCES.

- o Los conectivos lógicos entre antecedentes, es decir, los operadores AND, OR y NOT:

Como ya se dijo anteriormente la lógica clásica puede considerarse como un caso particular de la lógica difusa. Para dicho caso límite, las tablas de verdad de los operadores lógicos clásicos y las de los operadores lógicos difusos deben coincidir [12].

Si se considera la tabla 6, tabla clásica de verdad para los operadores lógicos AND, OR y NOT:

A	B	AND	A	B	OR	A	NOTA
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		

Tabla 6 Tablas clásicas de verdad para los operadores lógicos AND, OR y NOT

Se establece una equivalencia entre lógica clásica y difusa, teniendo en cuenta que la equivalencia de estas tablas debe prevalecer y que, además, al resto de valores se les debe asignar números enteros comprendidos entre 0 y 1. Una posibilidad para esta equivalencia es la siguiente:

A AND B: $\min(A, B)$

A OR B: $\max(A, B)$

NOT A: $1 - A$

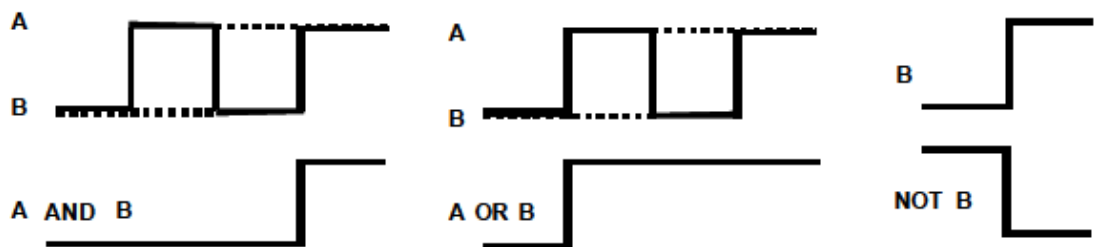
Con esta generalización las tablas de verdad para la lógica difusa quedarían del siguiente modo:

A	B	$\min(A,B)$	A	B	$\max(A,B)$	A	$1-A$
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		

Tabla 7 Tablas de verdad para lógica difusa

Como se puede comprobar, se siguen cumpliendo las tablas de verdad, como era de esperar según lo enunciado en el principio de este apartado. La misma información se encuentra recogida en la ilustración 26.

LÓGICA CLÁSICA



LÓGICA DIFUSA

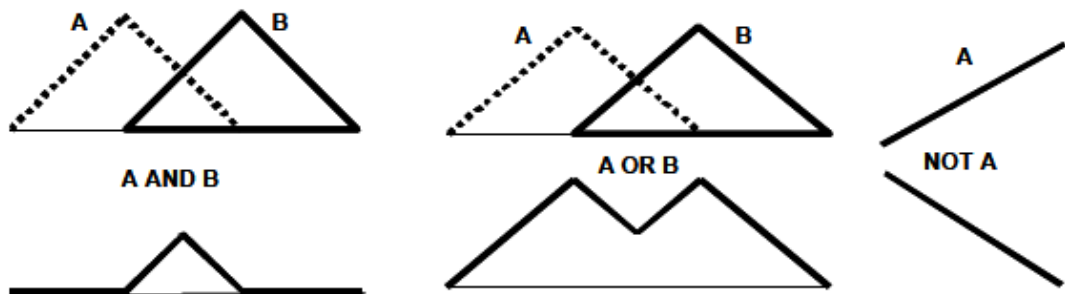


Ilustración 26 Actuación de los operadores AND, OR y NOT en lógica clásica y difusa

- El operador lógico ENTONCES, que representa implicación:

El conectivo ENTONCES representa implicación entre el antecedente y el consecuente. Cada regla puede tener un peso distinto a otras, es decir, que la salida de los antecedentes sea multiplicada por un factor que prefija el usuario antes de ver el resultado en los consecuentes [12].



La unión del resultado de todas las reglas es la agregación. Una vez evaluadas todas las reglas y obtenidos todos los conjuntos difusos de salida modificados, hay que realizar la agregación de todas las reglas para obtener un resultado único de la actuación de todas ellas. Esta agregación es una unión lógica que se define como máximo o suma algebraica de los conjuntos de salida, obteniéndose así un conjunto de salida único, asociado a la variable de salida [14].

2.9.5 MÉTODOS DE DESDIFUSIÓN

La entrada al bloque desdifusor es el conjunto difuso de salida, resultado del bloque de inferencia y la salida es un valor concreto. Para obtener, a partir del conjunto difuso de salida, un resultado concreto, se aplican métodos matemáticos. Entre estos métodos matemáticos los más destacados son [14]:

- **Método del máximo:** Se elige como valor para la variable de salida aquél para el cual la función de pertenencia del conjunto difuso de salida es máxima.
- **Método del centroide:** Utiliza como salida del sistema el centro de gravedad de la función de pertenencia del conjunto de salida.
- **Método de la altura:** Se calcula para cada regla el centro de gravedad del conjunto difuso de la salida y después se calcula la salida del sistema como la media ponderada.

3. SISTEMA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN.

En el siguiente capítulo se explicara el método seguido para la obtención de las señales de vibración de los rodamientos. Como ya se comento en la introducción, la obtención de las señales no forma parte de este proyecto, sino que fueron medidas como parte de un trabajo dirigido en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, realizado por el alumno Iván Martínez Aldana [15].

3.2 EQUIPO DE ENSAYO

A continuación se describirán brevemente todos los equipos implicados en el sistema experimental:

- **MÁQUINA DE ENSAYO**

Para obtener las señales de vibración, se empleó la el banco de ensayos “Rotor Kit MFS 2004” [15] que puede observarse en la ilustración 27.

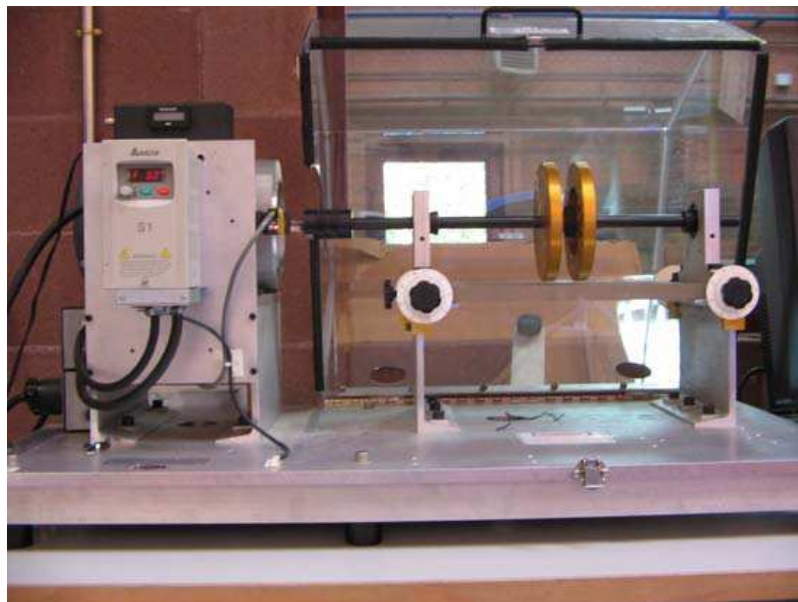


Ilustración 27 Máquina de ensayo de rodamientos

Esta máquina fue diseñada por la empresa Spectra Quest, para el ensayo de rodamientos y elementos rotatorios, pudiendo ser utilizada a altas velocidades.

- **ACELERÓMETRO**

Se utilizó un acelerómetro de la marca MMF y modelo KD 37V. Este amplificador puede observarse en la ilustración 28.

- **AMPLIFICADOR**

Se empleó amplificador, también de la marca MMF, modelo M32 de un canal, con un ancho de banda de 30 KHz (ilustración 29), y cuyos factores de amplificación pueden variar entre 1, 10 y 100 mV/ms-2. Durante el ensayo se usó en posición x10 [15].



Ilustración 28 Acelerómetro



Ilustración 29 Amplificador

- **TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

La tarjeta de adquisición de datos utilizada es de la marca Keithley, modelo KUSB-3100 de ocho canales, con una frecuencia de muestreo máxima de 1 MHz por canal (ilustración 30). Presenta entradas tanto analógicas como digitales. Durante la toma de datos se utilizaron solamente las entradas analógicas [15].



Ilustración 30 Tarjeta de adquisición de datos



Ilustración 31 Rodamiento ER10K

• RODAMIENTO DE ENSAYO

Se emplearon rodamientos de una hilera de bolas ER10K de la empresa MB Manufacturing (ilustración 31). En concreto se emplearon 4 rodamientos. Uno en perfectas condiciones, otro con fallo en bola, otro con fallo en pista interna y finalmente uno con fallo en la pista externa.

Las características principales de este rodamiento se muestran en la tabla 8.

Diámetro interior [mm]	15,875
Diámetro exterior [mm]	46,990
Diámetro medio [mm]	33,490
Número de bolas	8
Diámetro de las bolas [mm]	7,940
Ángulo de contacto [°]	0

Tabla 8 Características rodamiento ER10K

3.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la adquisición de datos se estableció una frecuencia de muestreo de 5000 Hz. Esta frecuencia indica el número de muestras que toma en un segundo, en este caso serían 5000 muestras por segundo [15]. Del mismo modo se tomaron medidas para los valores de velocidad del eje de 600 rpm, 1200 rpm y 1800 rpm. El motivo es observar cómo afecta la velocidad en las señales producidas por los rodamientos con y sin defecto.

El tamaño muestral debe ser tal que nos permita tener al menos una cantidad de datos cercana a una vuelta completa del rodamiento. Dada la velocidad de giro del rodamiento ω y la frecuencia de muestreo Δf , el tamaño muestral necesario vendrá dado por la ecuación (36) [16]:

$$Tamaño_muestral = \frac{\Delta f}{\omega} \quad (36)$$

Así para las velocidades propuestas la cantidad de datos necesaria para registrar una vuelta completa se muestra en la tabla 9:

Ω (rpm)	Ω (Hz)	T (s)	MUESTRAS NECESARIAS
600	10	0.1	500
1200	20	0.05	250
1800	30	0.033	167

Tabla 9 Muestras necesarias para cada velocidad de giro

Como se puede observar, la señal a menor velocidad corresponderá a la de mayor número de muestras. Para comparar señales, éstas deberán tener la misma longitud de puntos, se tomarán 500 muestras como mínimo en cada señal.

Finalmente el número de señales que se tomaron fueron: 5 de 50000 muestras, 5 de 25000, 5 de 20000, 5 de 15000, 5 de 10000 y otras tantas de 5000 por cada rodamiento [15].

3.4 NOMENCLATURA DE LAS SEÑALES UTILIZADAS.

La nomenclatura utilizada para las señales a tratar se compone de 4 identificadores X-Y-Z-T.

- X indica el tipo de defecto presente en el rodamiento.
 - A → Rodamiento sin defecto
 - B → Rodamiento con defecto en bola
 - I → Rodamiento con defecto en la pista interna

- O → Rodamiento con defecto en la pista externa
- Y nos da información sobre la velocidad de giro del motor:
 - 10 → $f=10\text{Hz}$
 - 20 → $f=20\text{Hz}$
 - 30 → $f=30\text{Hz}$
- Z indica el número de muestras tomadas para la señal en cuestión, puede variar entre los siguientes valores:
 - 5000 muestras
 - 10000 muestras
 - 15000 muestras
 - 20000 muestras
 - 25000 muestras
 - 50000 muestras
- T indica el número de la señal, ya que se tomaron 5 señales para cada caso.

De esta manera, por ejemplo la señal I-30-5000-2 sería la segunda señal tomada con 5000 muestras para el rodamiento con defecto en la pista interna girando a una frecuencia de 30 Hz. Esta señal puede observarse en la ilustración 32:

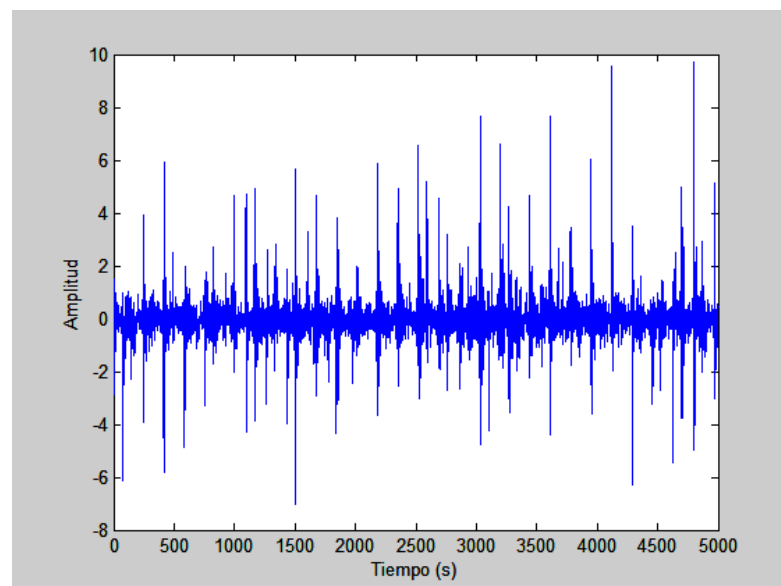


Ilustración 32 Señal I-30-5000-2

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se ha mencionado, cuando hablamos sobre el sistema experimental del proyecto, los rodamientos utilizados son de la marca *MB manufacturing* más concretamente del modelo ER10K. Como punto de partida y primer patrón de comparación, vamos a recuperar las características principales de este modelo de rodamiento así como las expresiones analíticas de las frecuencias naturales de fallo de un rodamiento, que venían dadas por la tabla 8 y las ecuaciones (19), (20), (21) y (22) respectivamente, para calcular precisamente estas frecuencias naturales de fallo para nuestro modelo concreto de rodamiento.

$$FTF = \frac{RPM}{60} \left(\frac{1}{2} \right) \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad [\text{Hz}] \quad (19)$$

$$BPFI = \frac{RPM}{60} \left(\frac{Nb}{2} \right) \left(1 + \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad [\text{Hz}] \quad (20)$$

$$BPFO = \frac{RPM}{60} \left(\frac{Nb}{2} \right) \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad [\text{Hz}] \quad (21)$$

$$BSF = \frac{RPM}{60} \left(\frac{Pd}{2Bd} \right) \left(1 - \frac{(Bd^2 \cos^2 \phi)}{Pd^2} \right) \quad [\text{Hz}] \quad (22)$$

Estos cálculos se han realizado mediante un programa diseñado para el efecto, obteniéndose los resultados de la tabla 10:

Frecuencia giro [Hz]	FTF	BPFI	BPFO	BSF
10	3,815	49,483	30,517	19,904
20	7,629	98,967	61,033	39,808
30	11,444	148,450	91,550	59,712

Tabla 10 Frecuencias naturales de fallo para cada frecuencia de giro

Con el fin de hacer estos valores independientes de la frecuencia de giro del eje, se han creado los parámetros adimensionales que se muestran en la tabla 11:

FTF/Frecuencia giro	BPFI/Frecuencia giro	BPFO/Frecuencia giro	BSF/Frecuencia giro
0,381	4,948	3,052	1,990

Tabla 11 Frecuencias naturales de fallo entre frecuencia de giro

Dado que los parámetros coinciden sea cual sea la velocidad de giro del eje, debido a la linealidad de las expresiones analíticas de las frecuencias naturales de fallo con la velocidad, se presentan en una única columna.

4.2 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

El objetivo de este apartado es evaluar la capacidad de cada uno de los métodos explicados en el capítulo anterior para detectar la existencia de defectos en los rodamientos.

Para conseguir este propósito, se tomarán muestras de cada tipo de rodamiento y se intentará identificar la frecuencia correspondiente con el defecto presente en estos rodamientos por los diferentes métodos que estudiamos a lo largo del marco teórico de este proyecto.

En primer lugar trabajaremos con la transformada rápida de Fourier (FFT: Fast Fourier Transform), función de Matlab[®] que, permite un ahorro computacional importante a la hora de calcular la Transformada de Fourier discreta. Dando paso posteriormente al procesamiento previo con la transformada de Hilbert. Se pretende demostrar que, con este segundo método, se obtienen mejores resultados que con la FFT para el análisis de vibraciones de rodamientos con defectos.

Todas estas evaluaciones serán realizadas mediante Matlab[®].

4.2.1 ANÁLISIS DE LA SEÑAL MEDIANTE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Se va a proceder a representar varias de la señales de vibración de rodamientos tanto en el dominio temporal como en el de la frecuencia. Se intentará identificar en estas representaciones las frecuencias naturales de fallo.

Las señales elegidas han sido las de 50000 puntos por disponer de una mayor cantidad de datos, pero se comprobó que los resultados eran similares independientemente del número de muestras tomadas.

Es importante que se recuerde que, a priori, se sabe que el resultado no será muy positivo, debido a los numerosos inconvenientes de esta transformada, que se enumeraron a lo largo del marco teórico, a la hora de tratar con señales no estacionarias.

4.2.1.1 RODAMIENTO SIN DEFECTO

Se ha elegido representar las señales de rodamiento sin defecto: A-10-50000-3, A-20-50000-3 y A-30-50000-3, correspondientes a las diferentes velocidades de ensayo. La representación en ambos dominios puede observarse en las ilustraciones 33, 34 y 35.

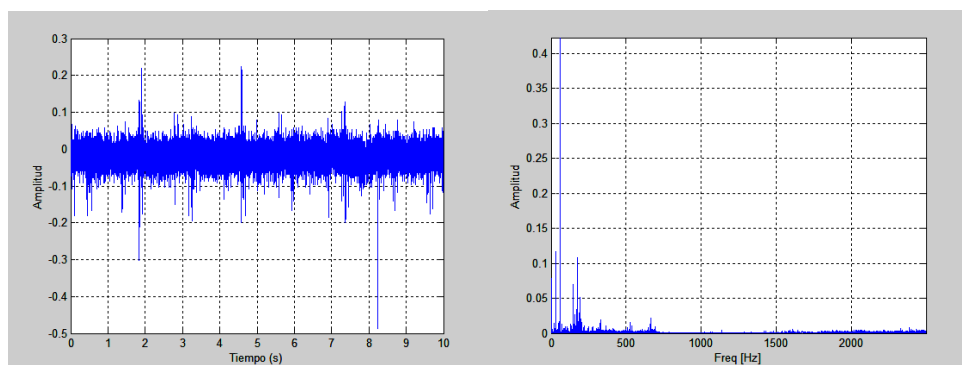


Ilustración 33 Rodamiento sin defecto girando a 10 Hz

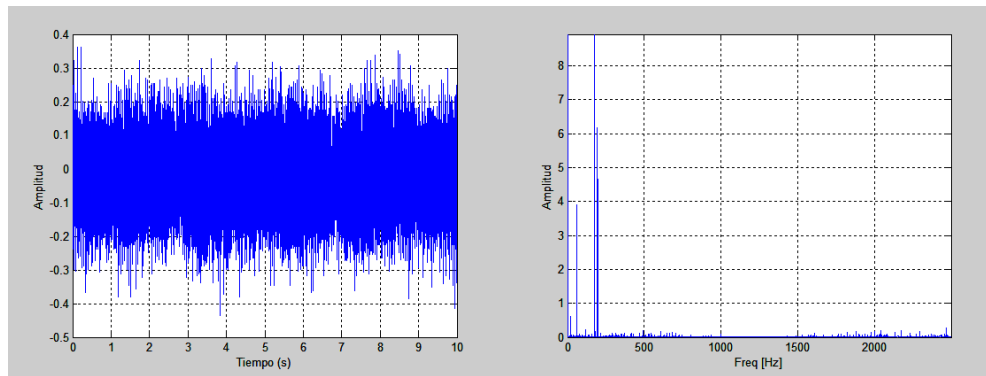


Ilustración 34 Rodamiento sin defecto girando a 20 Hz

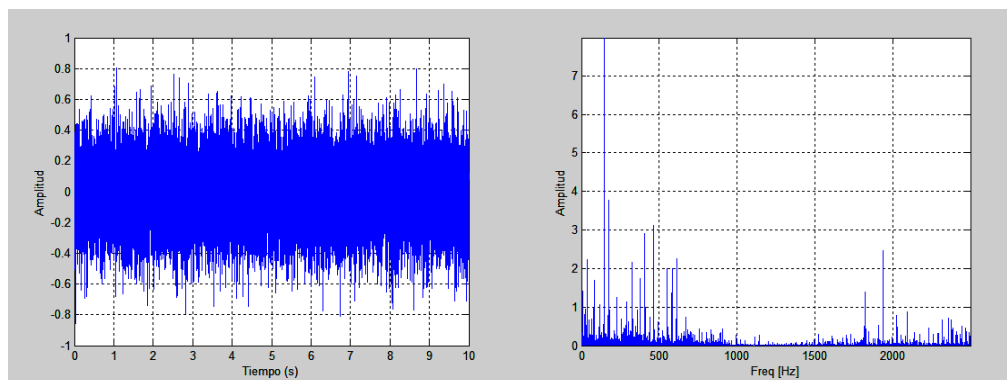


Ilustración 35 Rodamiento sin defecto girando a 30 Hz

En primer lugar, se puede observar cómo, a medida que vamos aumentando la frecuencia de giro del eje, aumenta también la amplitud de las vibraciones en el dominio temporal. La causa de esto puede ser el ruido, que se ve incrementado al aumentar la velocidad del eje.

En la ilustración 36 se ha realizado un zoom al espectro de frecuencias de la señal A-20-50000-3 del rodamiento en buenas condiciones de funcionamiento girando a 20 Hz y como se puede comprobar, para esta frecuencia en la que se esperaba encontrar un pico entre los 7 y los 8 Hz, es imposible detectar este pico.

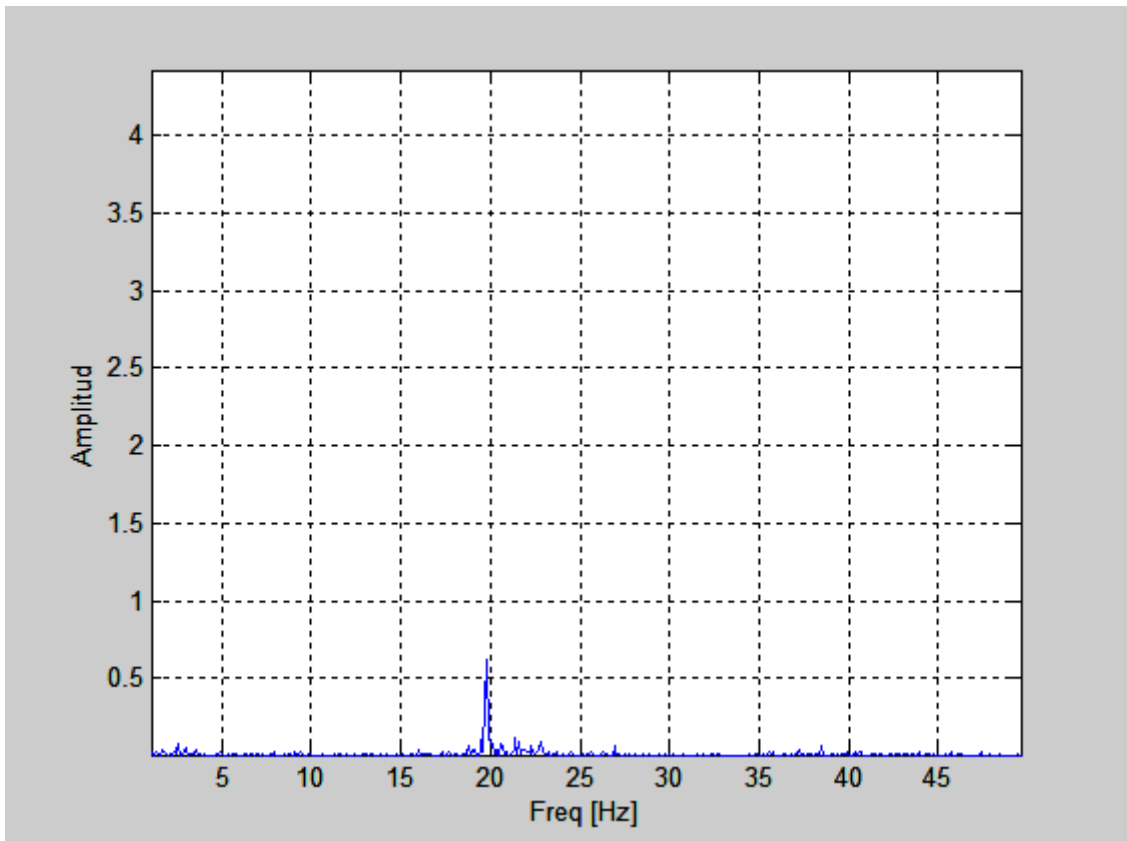


Ilustración 36 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 20 Hz

4.2.1.2 RODAMIENTO CON DEFECTO EN BOLA

Se representan ahora las mismas señales sólo que esta vez pertenecientes al rodamiento con fallo en bola. Esto puede observarse en las ilustraciones 37, 38 y 39.

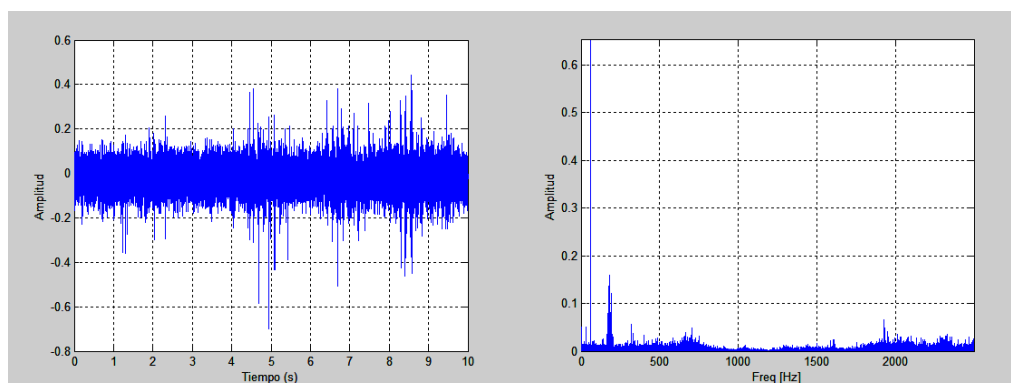


Ilustración 37 Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz

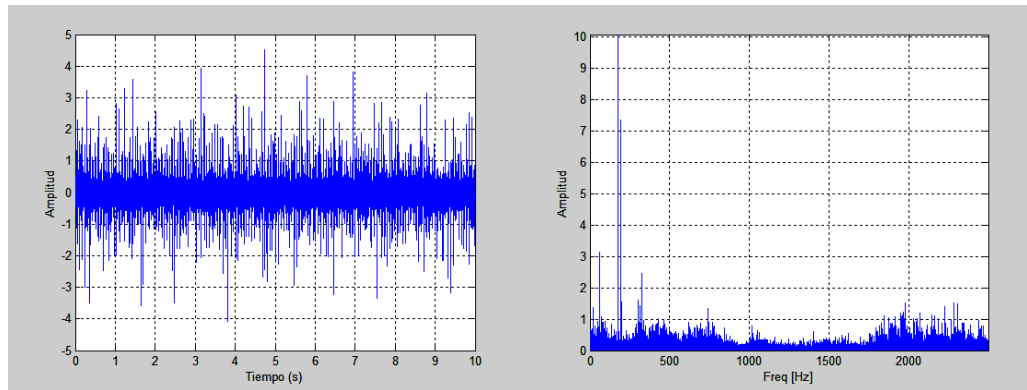


Ilustración 38 Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz

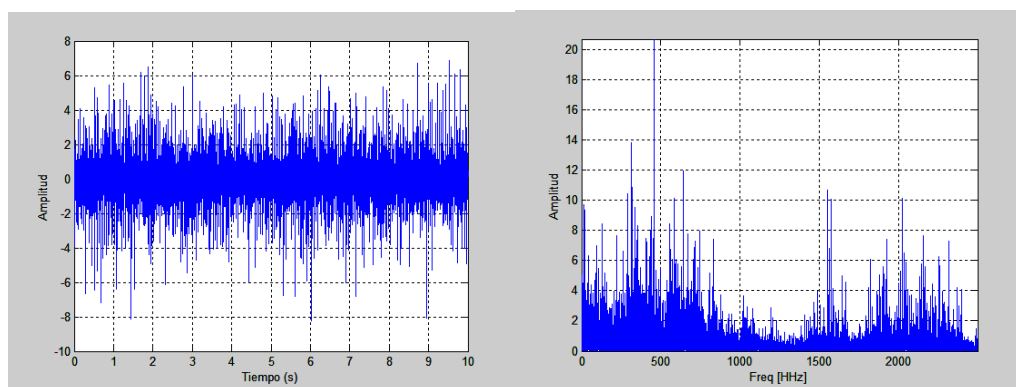


Ilustración 39 Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

Se vuelve a apreciar, que a medida que aumenta la frecuencia de giro del eje aumenta la amplitud de la vibración. Además se observa que para las frecuencias más altas de giro del eje, aparecen picos de vibración en frecuencias medias (0-750 Hz) y altas (15000- 25000 Hz).

Si se vuelve a centrar la atención en el espectro de la señal procedente del rodamiento con fallo en bola girando a 20 Hz (ilustración 42), puede verse, cómo también en este caso no es posible identificar la frecuencia de defecto esperada que estaría alrededor de los 40 Hz.

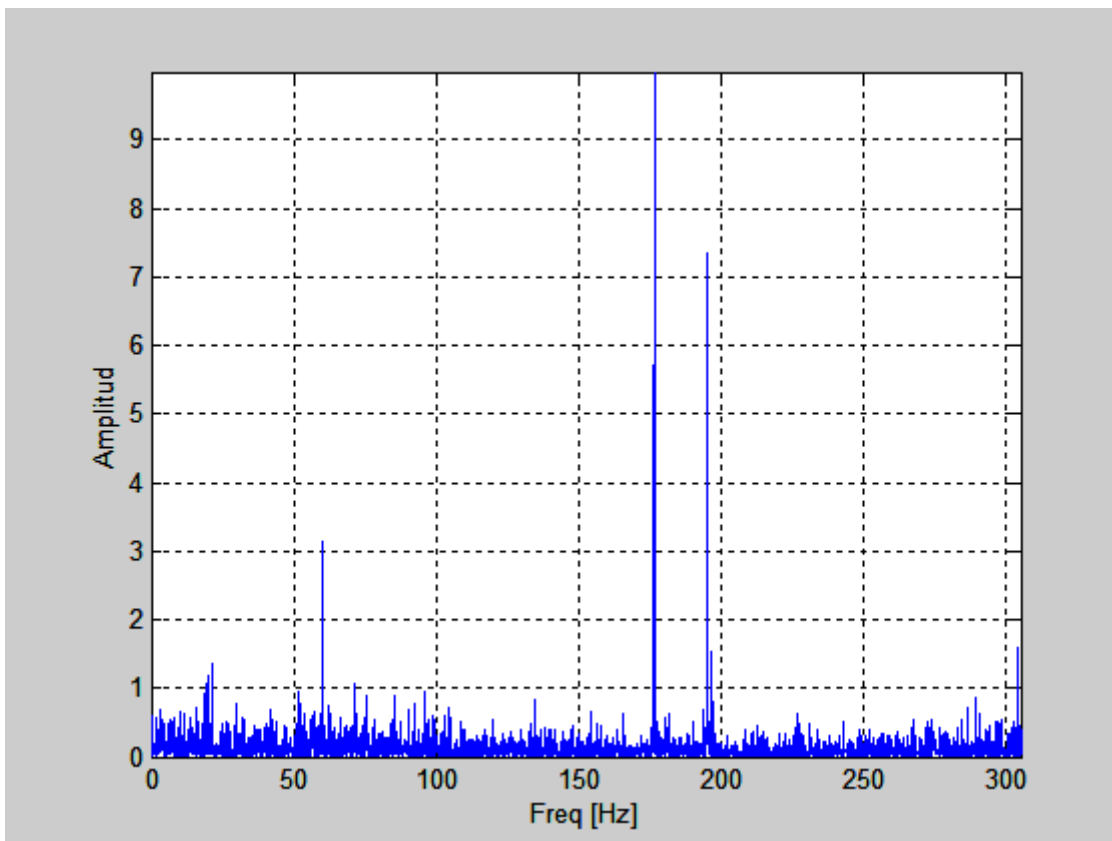


Ilustración 40 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz

4.2.1.3 RODAMIENTO CON DEFECTO EN PISTA INTERNA

Se repite el procedimiento anterior esta vez con las señales I-10-50000-3, I-20-50000-3 e I-30-50000-3 (ilustraciones 43, 44 y 45).

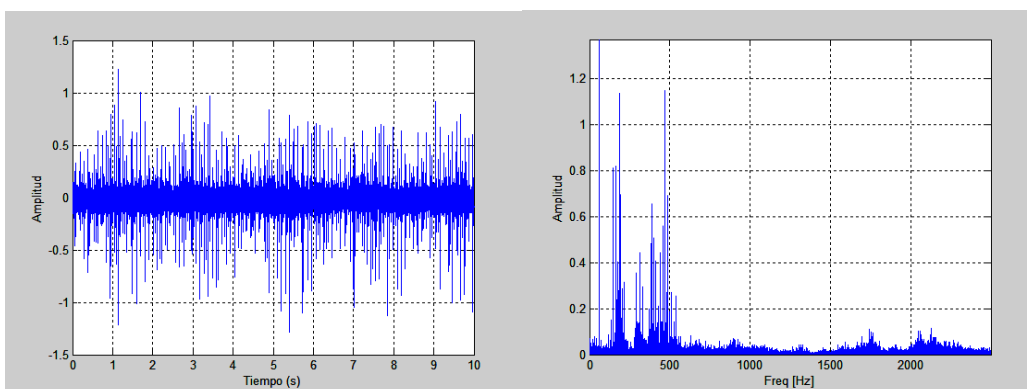


Ilustración 41 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz

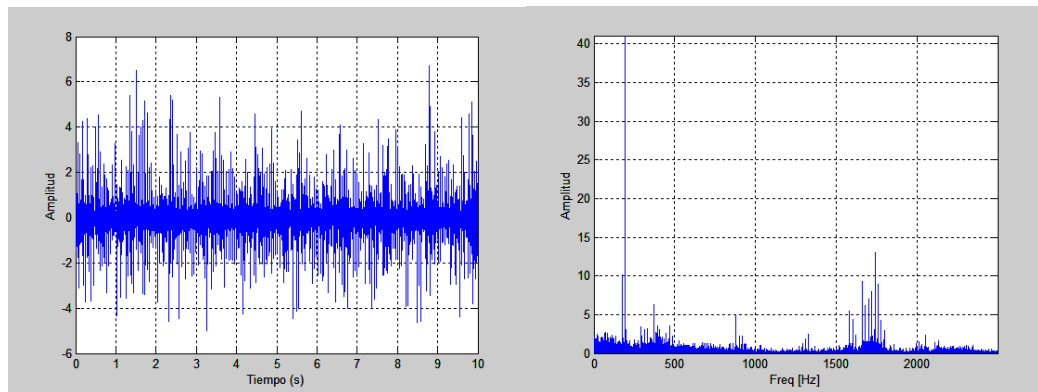


Ilustración 42 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 20 Hz

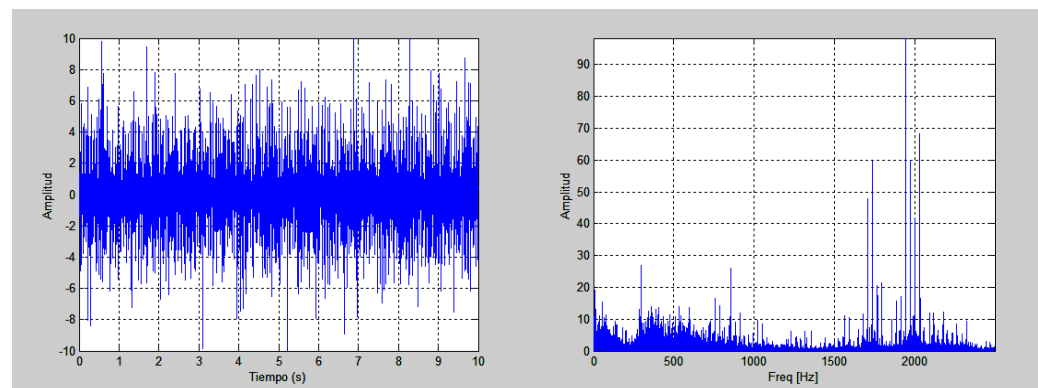


Ilustración 43 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 30 Hz

Se repite el comportamiento en el sentido de que, al aumentar la frecuencia de giro, aumenta la amplitud de las vibraciones.

De nuevo en el detalle (ilustración 44) es imposible identificar la frecuencia natural de fallo que para esta señal debería situarse en torno a los 99 Hz.

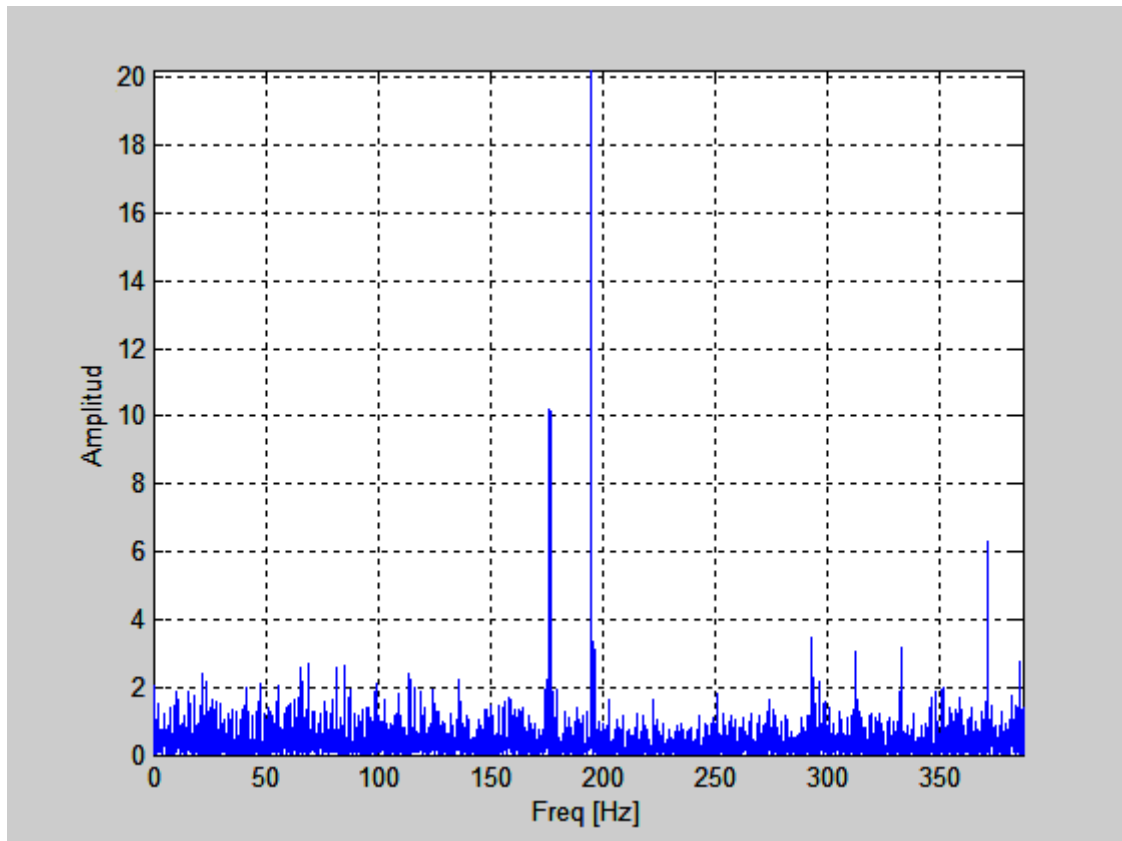


Ilustración 44 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a 20 Hz

4.2.1.4 RODAMIENTO ON DEFECTO EN PISTA EXTERNA.

Se procede en último lugar con las señales O-10-50000-3, O-20-50000-3 y O-30-50000-3. Correspondientes al rodamiento con el defecto localizado en su pista externa (ilustraciones 45, 46 y 47).

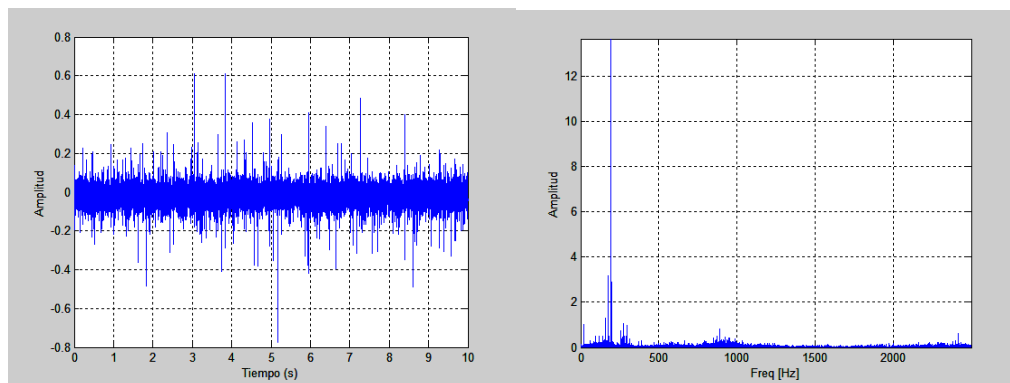


Ilustración 45 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 10 Hz

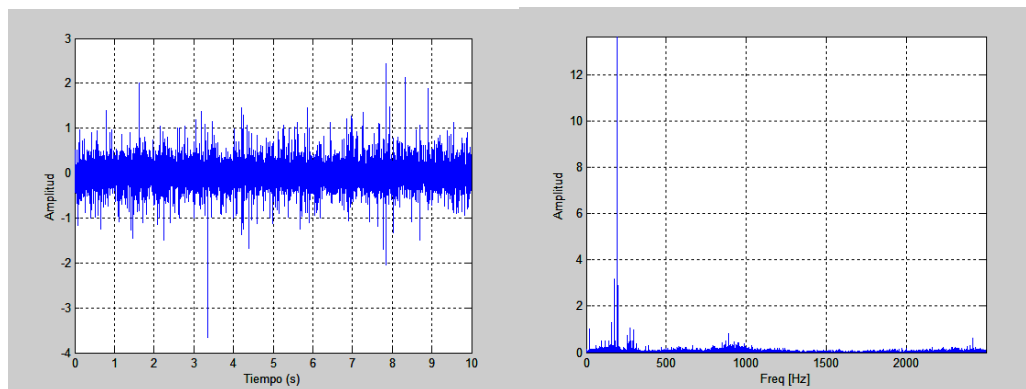


Ilustración 46 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 20 Hz

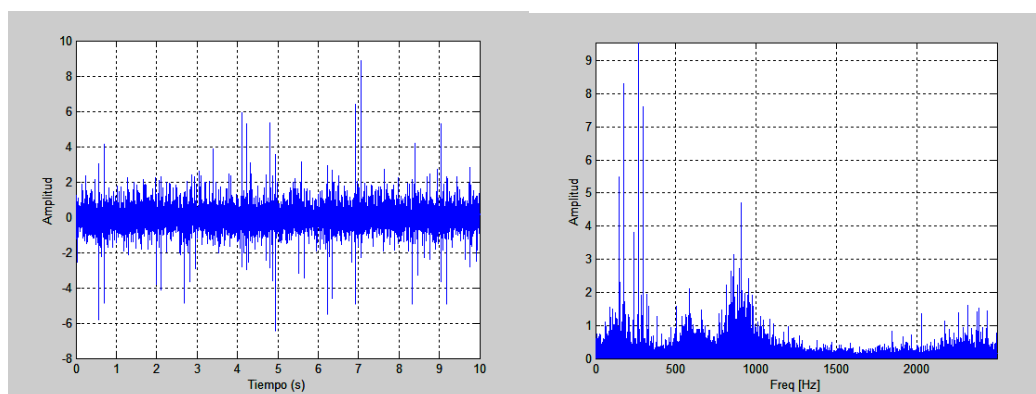


Ilustración 47 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 30 Hz

Nuevamente es imposible identificar en el detalle (ilustración 48), la frecuencia natural de fallo esperada para esta señal.

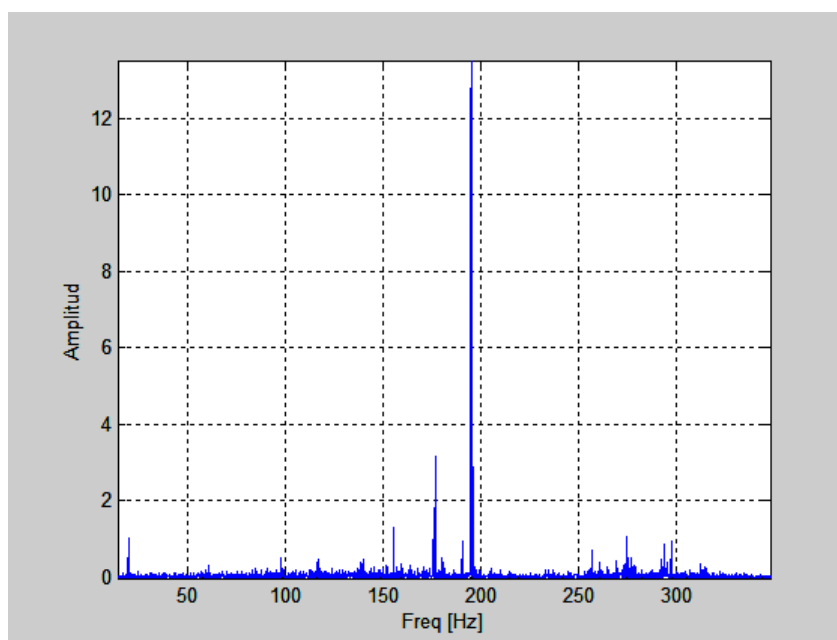


Ilustración 48 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista externa a 20 Hz



4.2.1.5 CONCLUSIONES DEL USO DE LA REPRESENTACIÓN TEMPORAL Y LA TRANSFORMADA DE FOURIER.

Mediante la representación de la señal en el dominio del tiempo, no se obtiene información útil para identificar un tipo concreto de defecto, debido al elevado nivel de ruido de la señal que además se ve incrementado con la velocidad de giro del eje. No obstante, esta representación puede indicarnos la presencia de algún defecto ya que la amplitud de las vibraciones es mucho mayor en los rodamientos dañados. Siendo el rodamiento con defecto en pista externa el que muestra un comportamiento más parecido en este sentido a un rodamiento normal.

Por otro lado se ha comprobado, como la Transformada de Fourier se muestra ineficaz a la hora de intentar localizar las frecuencias naturales de fallo.

4.2.2 TRANSFORMADA DE HILBERT

En este apartado se muestra la representación en el dominio del tiempo de las señales anteriores, a las que posteriormente se les aplica la transformada de Hilbert como método de filtrado, finalmente se aplica la transformada rápida de Fourier sobre las envolventes generadas para obtener los espectros de frecuencias.

4.2.2.1 RODAMIENTO SIN DEFECTO

Se representan las señales del apartado 4.2.1.1 correspondientes al rodamiento sin defecto girando a 10, 20 y 30 Hz (ilustraciones 49, 50 y 51).

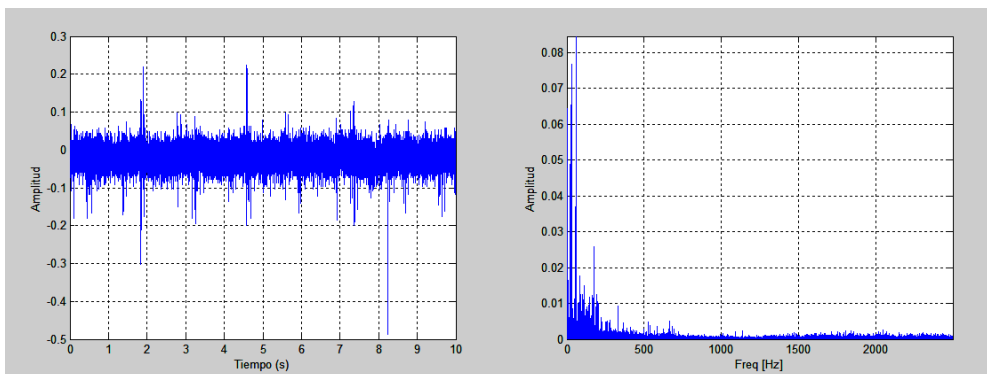


Ilustración 49 Rodamiento sin defecto girando a 10 Hz

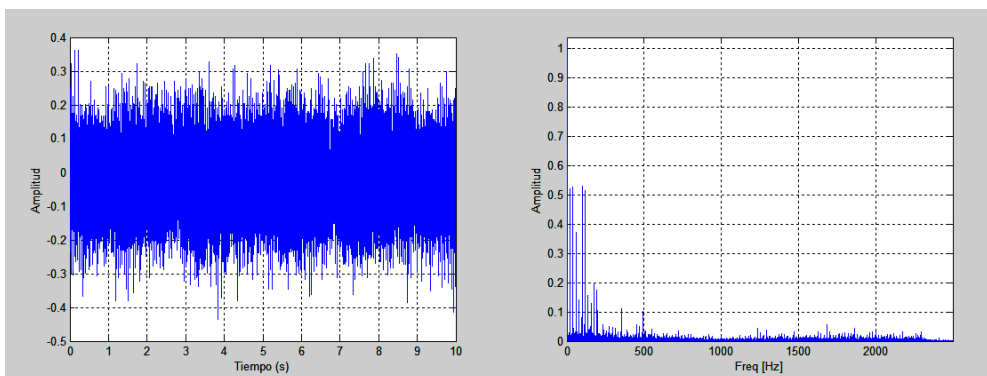


Ilustración 50 Rodamiento sin defecto girando a 20 Hz

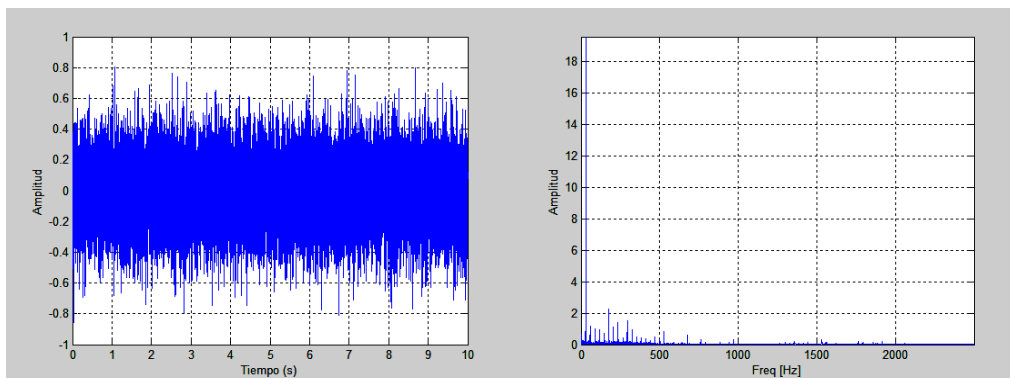


Ilustración 51 Rodamiento sin defecto girando a 30 Hz

Cuando se habló de la Transformada de Fourier se comentó que, al aumentar la frecuencia de giro del eje, lo hacía también el nivel de ruido. Se puede observar también que, ahora, al aumentar la frecuencia de giro, las componentes del espectro de frecuencias en bajas frecuencias tienen amplitudes significativamente más altas. Parece por tanto, a priori, que la señal de 30 Hz se encuentra mejor filtrada que sus respectivas de 10 y 20 Hz.

En un análisis más detallado del espectro de frecuencias de la señal A-30-50000-3 (ilustración 52), se distingue claramente un pico para la frecuencia de giro del motor (30Hz) y varios picos más pequeños para los múltiplos de esta frecuencia (60, 90...).

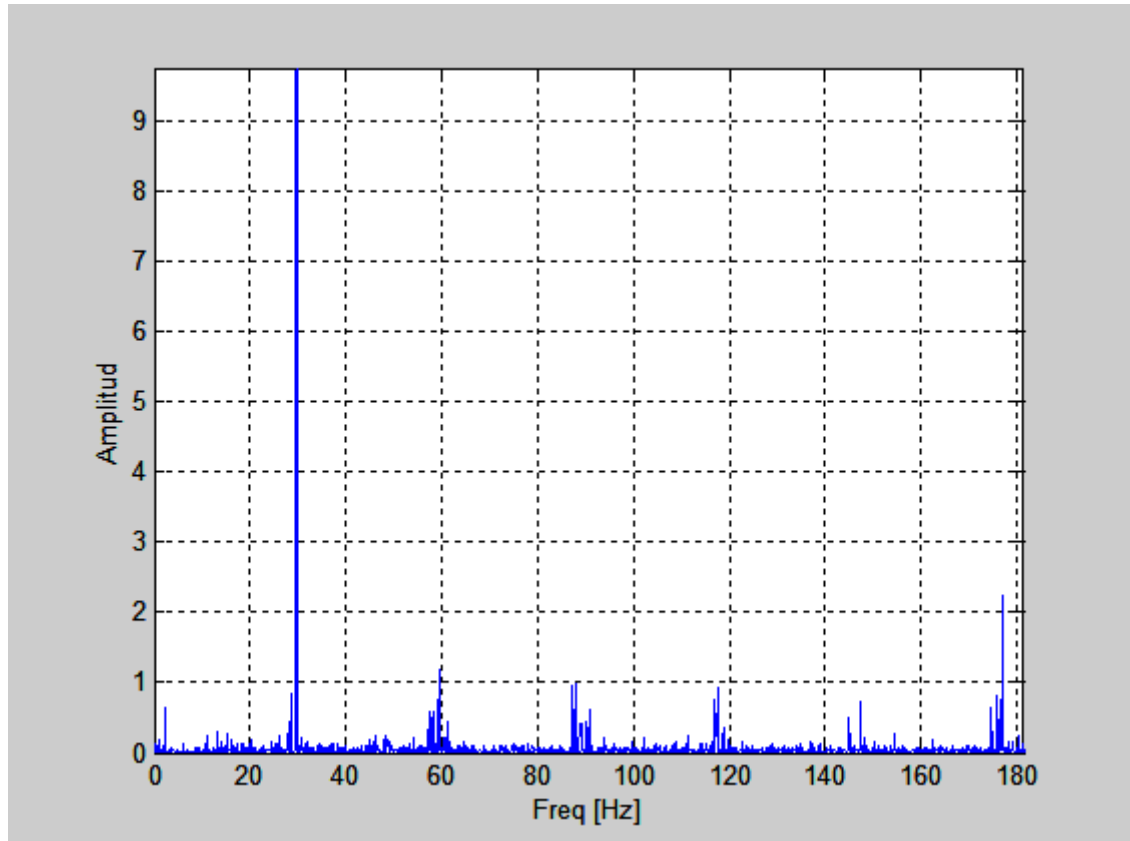


Ilustración 52 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 30 Hz

Este fenómeno también puede apreciarse en las señales de 10 y 20 Hz (en las ilustraciones 53 y 54 respectivamente), pero se observa cómo, a medida que bajamos la velocidad del eje, estos picos se van igualando cada vez más al nivel de ruido. Se puede decir por tanto, que éste método será más fiable cuanto mayor sea la frecuencia de giro del motor.

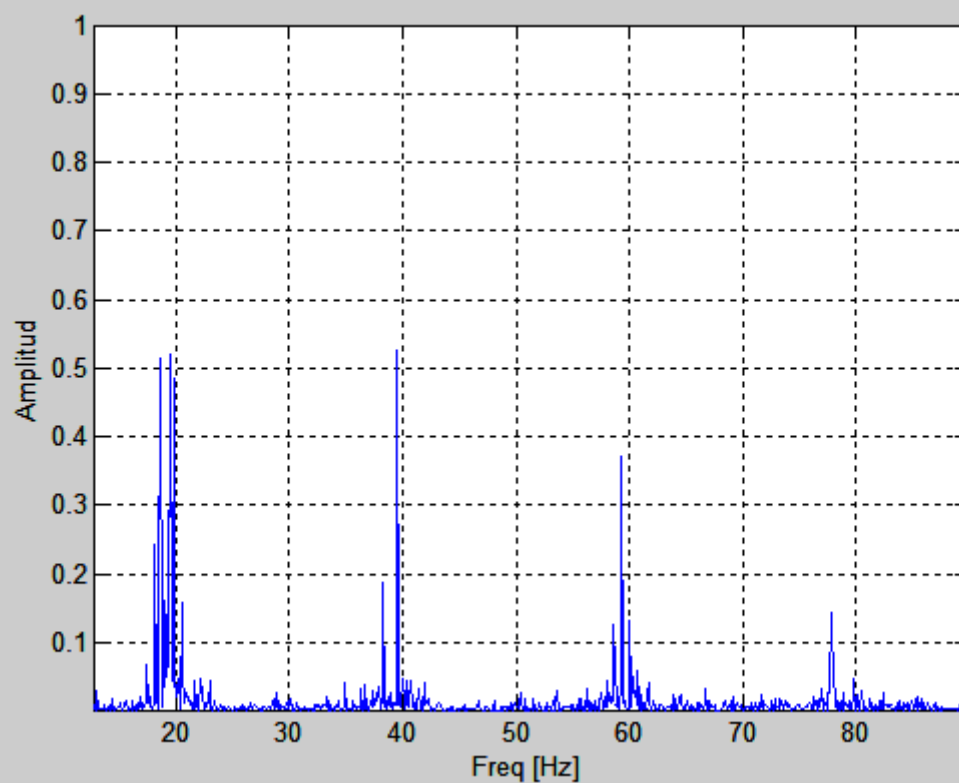


Ilustración 53 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 20 Hz

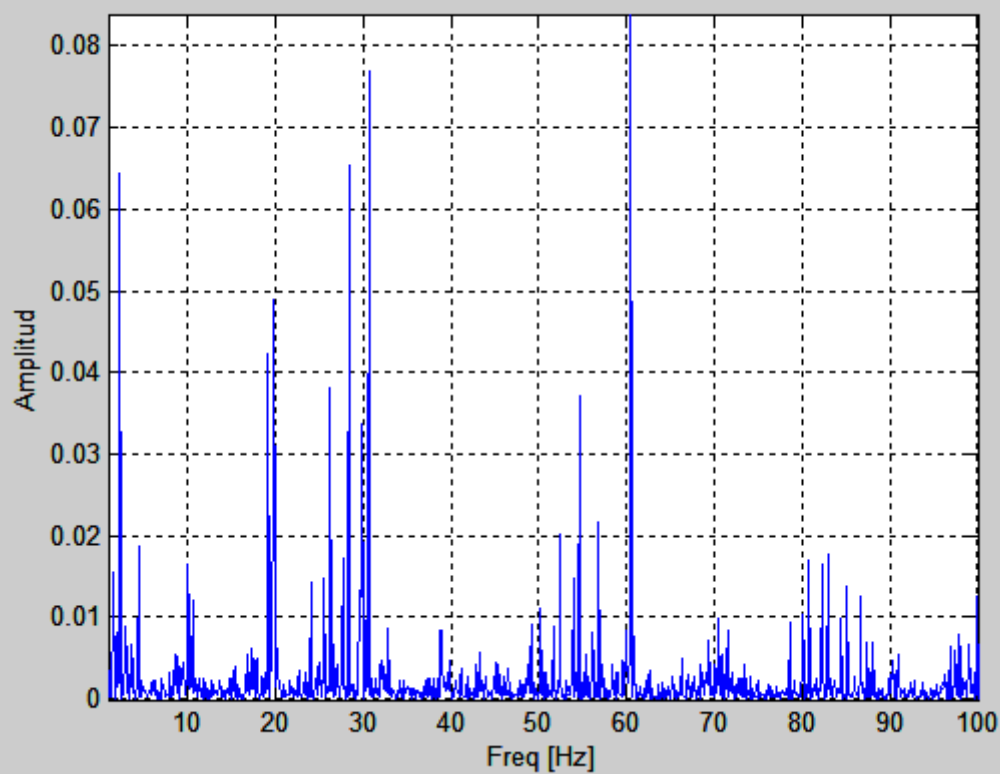


Ilustración 54 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 10 Hz

4.2.2.2 RODAMIENTO CON DEFECTO EN BOLA

Lo citado anteriormente vuelve a repetirse con las señales correspondientes al rodamiento con defecto en bola (ilustraciones 55, 56 y 57).

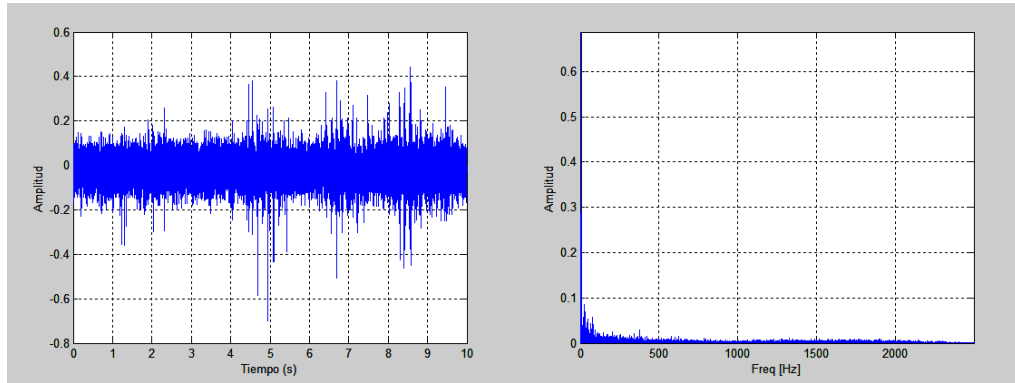


Ilustración 55 Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz

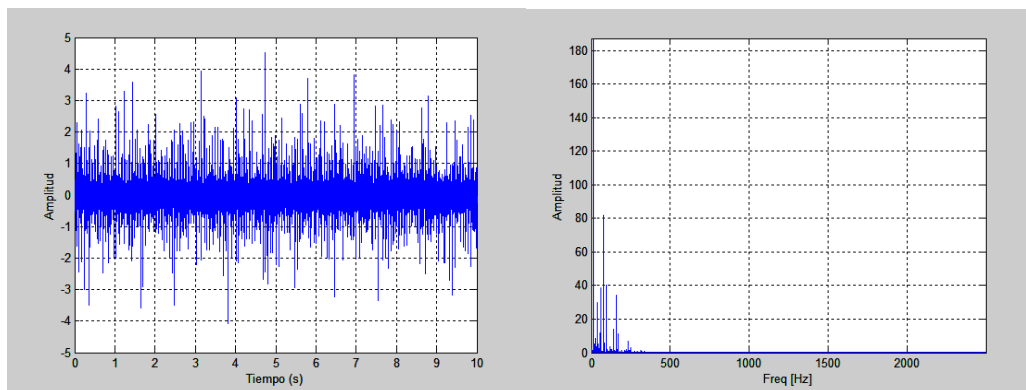


Ilustración 56 Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz

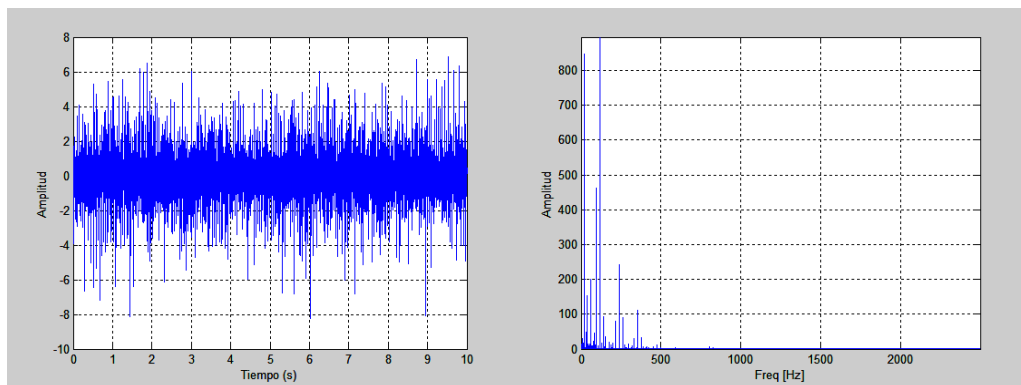


Ilustración 57 Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

Se vuelve observar que los espectros de frecuencia obtenidos parecen más claros a medida que aumentamos la frecuencia de giro del eje. Por este motivo, se elige la señal correspondiente a 30 Hz para realizar un análisis en profundidad (ilustración 58).

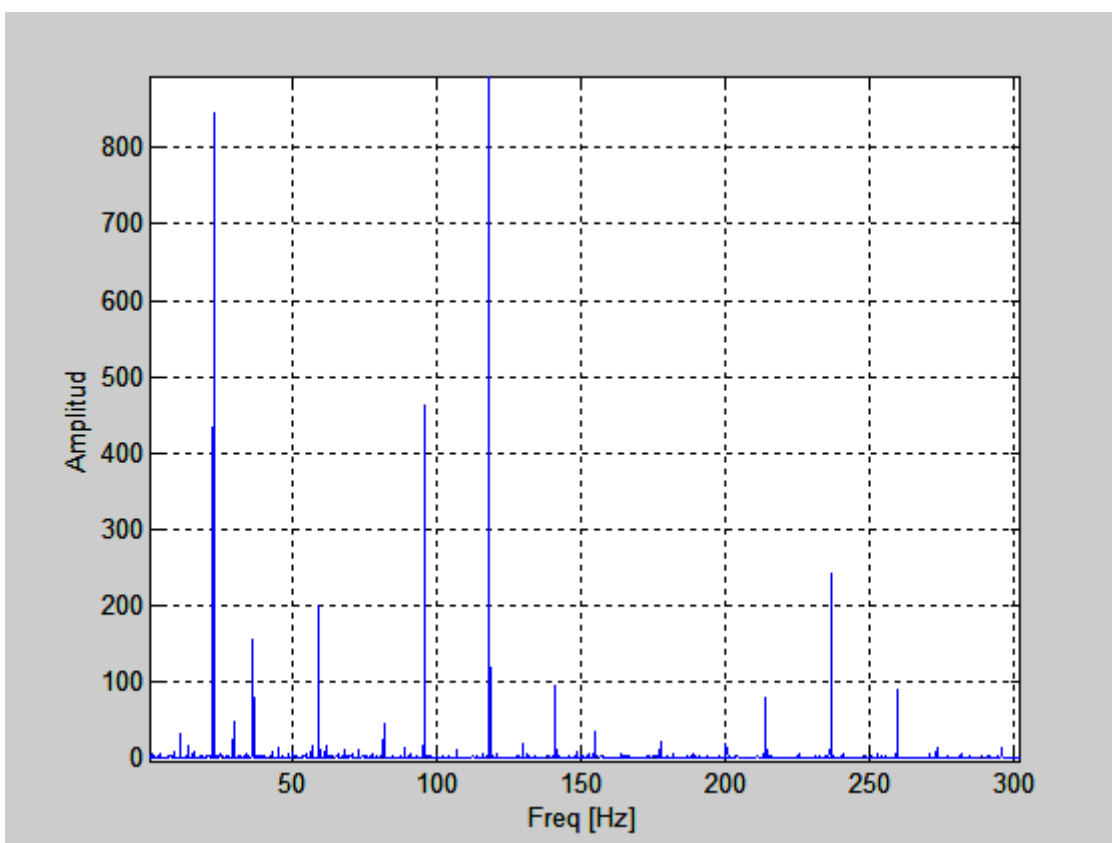


Ilustración 58 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

En este análisis en profundidad se ha procedido a identificar la posición de los 5 picos de frecuencia más importantes, con el objetivo de conseguir un patrón representativo del estado del rodamiento. En la tabla 12 se presentan los valores hallados y ordenados según su amplitud, para la señal representada en la ilustración 60.

Frecuencia [Hz]
118,4
22,7
95,7
236,9
59,2

Tabla 12 Posición de los 5 picos de frecuencia más importantes. Rodamiento con defecto en bola a 30 Hz

Una vez identificadas las posiciones de los picos de frecuencia más importantes, se procede a su análisis.



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Comenzando por la frecuencia más pequeña, es decir, 22.7 Hz, se ve de manera trivial que se trata de una frecuencia menor que la frecuencia de giro del eje (30 Hz). Con esto podemos descartar que se trate de una frecuencia de defecto. Recuperando la tabla de las frecuencias naturales de fallo, se puede observar que esta frecuencia es múltiplo de la frecuencia de giro de la jaula o lo que es lo mismo:

$$22.7Hz \approx 2FTF \quad (37)$$

La segunda frecuencia más pequeña es 59.2 Hz, es evidente que se trata de la frecuencia natural de defecto en bolas (59.712 Hz).

La siguiente frecuencia es 95.7 Hz, de la que podemos deducir que representa el segundo múltiplo de la frecuencia natural menos la primera frecuencia de 27.7Hz, que expresaba el segundo múltiplo de la frecuencia de giro de la jaula. Es decir:

$$95.7Hz \approx 2BSF - 2FTF \quad (38)$$

Por último 118.4 y 236.9 Hz son respectivamente el segundo y el cuarto múltiplo de la frecuencia natural de fallo en bola. Todo lo anterior se recoge en la tabla 13:

Frecuencia [Hz]	Significado
118,4	$2BSF$
22,7	$2FTF$
95,7	$2BSF - 2FTF$
236,9	$4BSF$
59,2	BSF

Tabla 13 Análisis de frecuencias de la señal B-30-50000-3

4.2.2.3 RODAMIENTO CON DEFECTO EN PISTA INTERNA

Se vuelve a repetir el proceso para las señales I-10-50000-3, I-20-50000-3 e I-30-50000-3 (ilustraciones 59, 60 y 61).

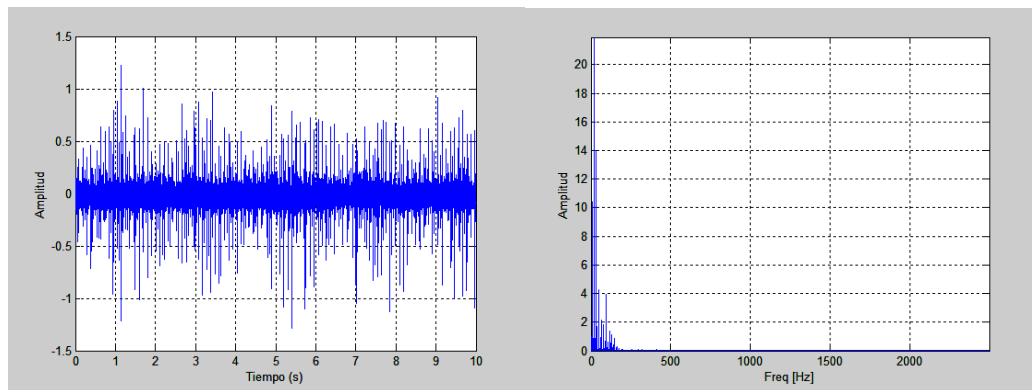


Ilustración 59 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz

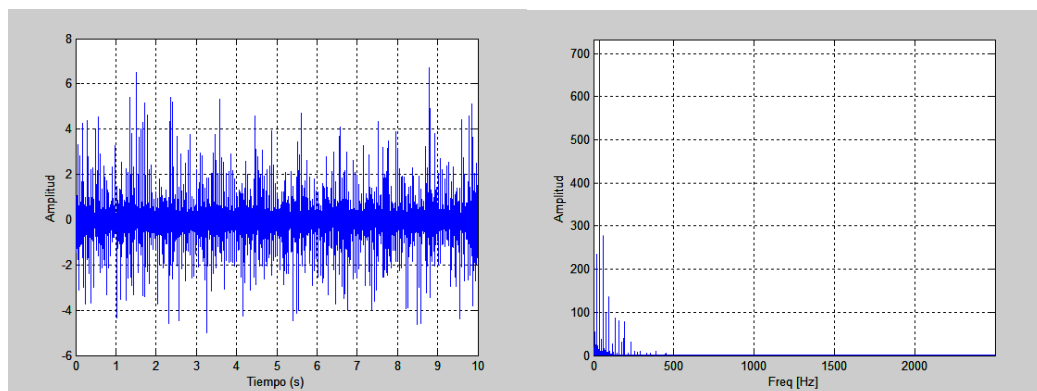


Ilustración 60 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 20 Hz

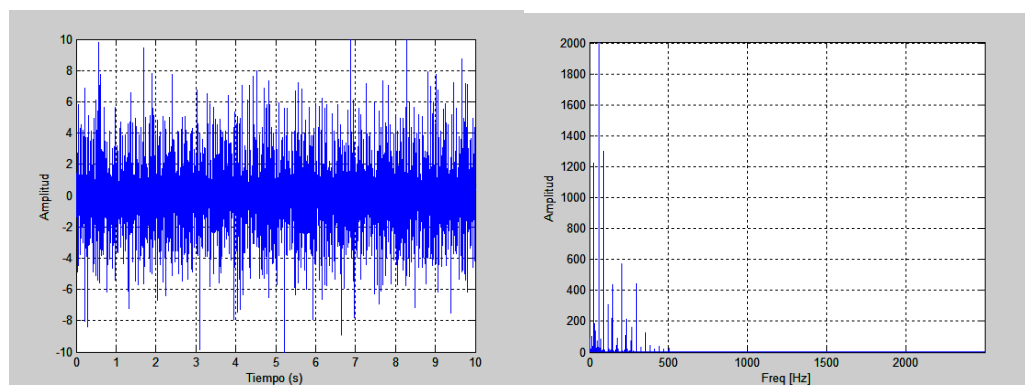


Ilustración 61 Rodamiento con defecto en pista interna girando a 30 Hz

Si se amplían cada uno de estos espectros de frecuencia observamos que se distinguen muy bien las frecuencias de vibración del eje (ilustraciones 62, 63 y 64).

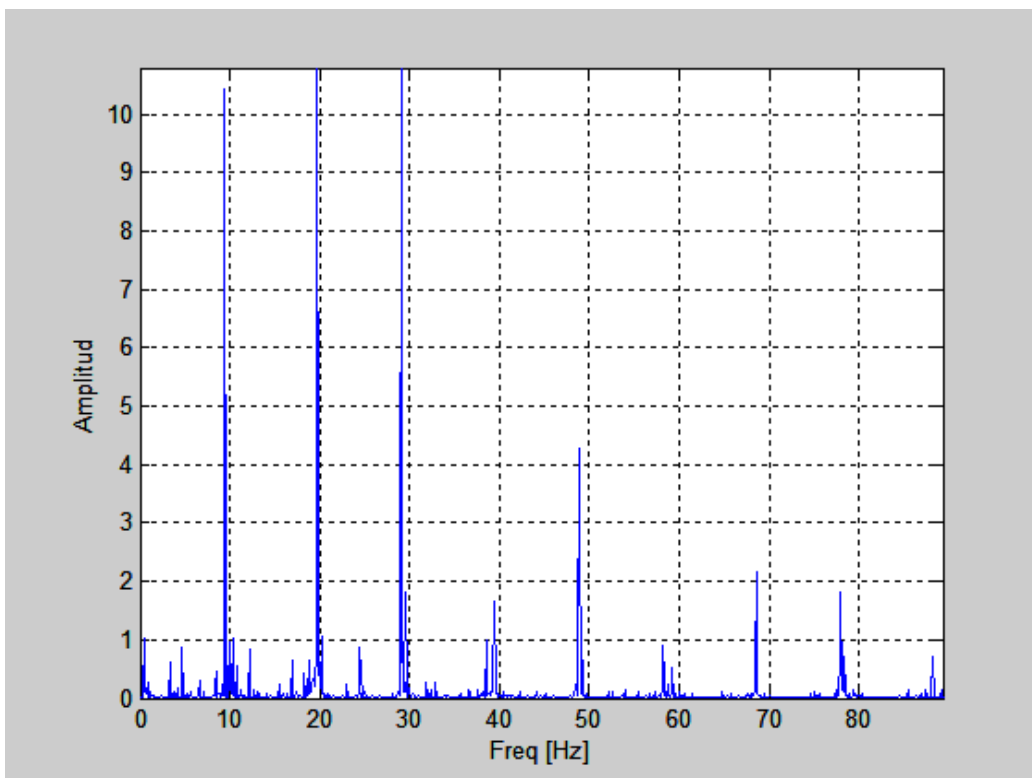


Ilustración 62 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a 10 Hz

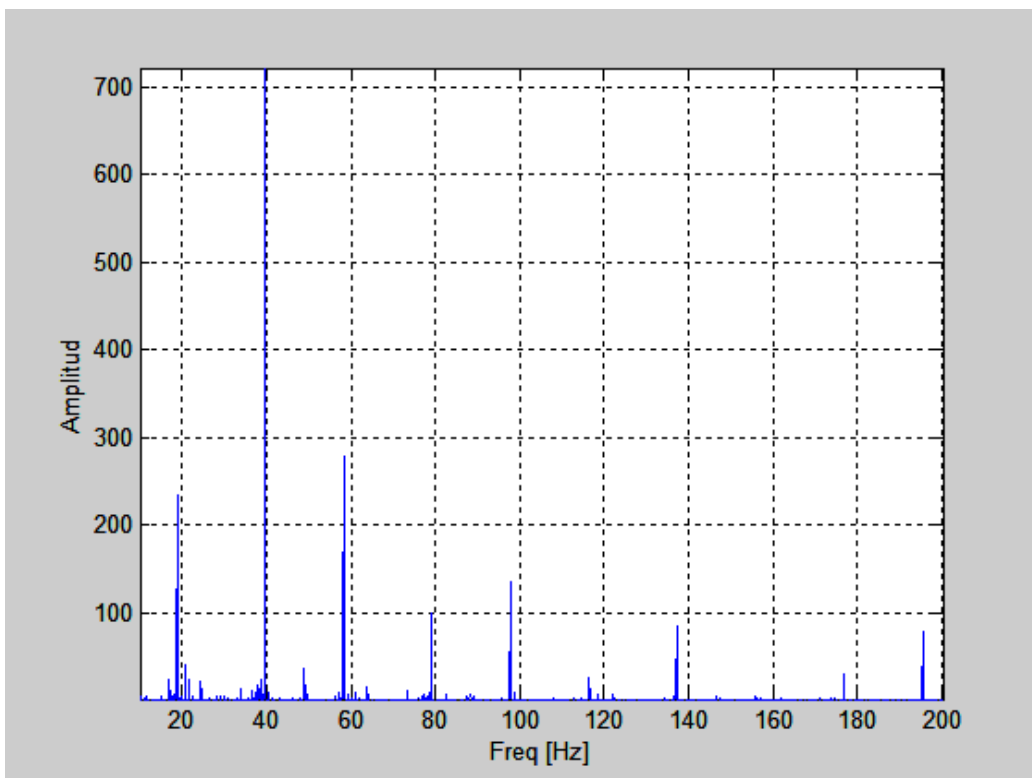


Ilustración 63 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a 20 Hz

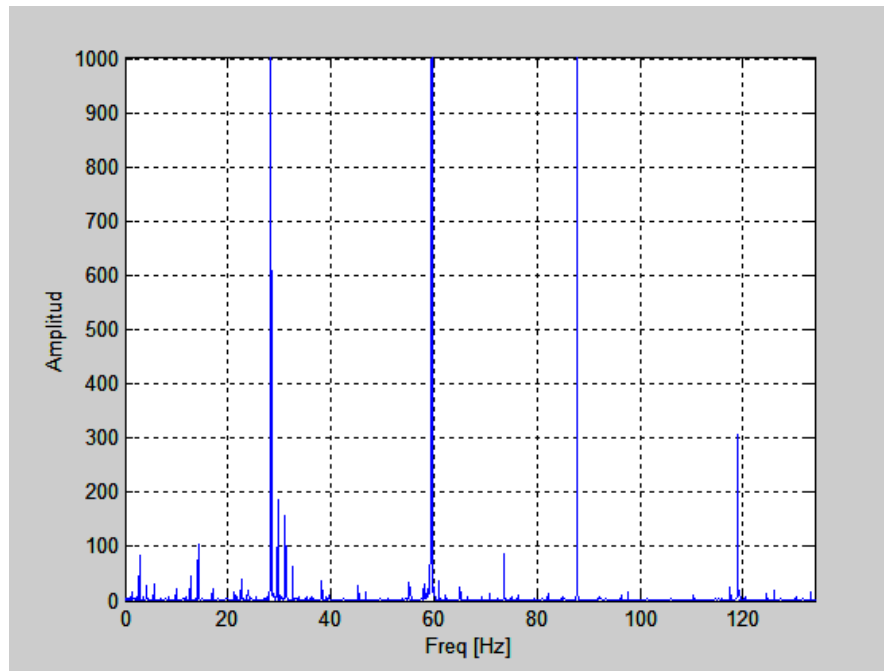


Ilustración 64 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista interna a 30 Hz

Se vuelve a analizar más en profundidad la señal de 30 Hz (ilustración 64), para analizar sus picos de frecuencia más significativos. En principio se podría hacer una interpretación parecida a la del apartado anterior, es decir, pensar que el pico en 60 Hz se trata del segundo armónico de la frecuencia de giro, pero si se observa en detalle la señal, se puede apreciar que en todos los múltiplos de 30 Hz hay varios picos, esto cobra bastante lógica si se contempla la opción de que exista la frecuencia de giro del motor y una frecuencia de defecto en bola de 59.73 Hz.

Si se desciende hasta el séptimo pico, se obtiene una frecuencia de 147.3 Hz que representa la frecuencia natural de fallo en pista interna. Los resultados se muestran en tabla 14.

Frecuencia [Hz]	Significado
59,5	<i>BSF</i>
87,8	<i>3FREQ MOTOR</i>
28,3	<i>FREQ MOTOR</i>
59,4	<i>BSF</i>
206,7	<i>BPFI+BSF</i>
294,5	<i>2BPFI</i>
147,3	<i>BPFI</i>

Tabla 14 Análisis de frecuencias I-30-50000-3

4.2.2.4 RODAMIENTO CON DEFECTO EN PISTA EXTERNA

Finalmente se procede de igual modo con las señales correspondientes al rodamiento con defecto en pista externa (ilustraciones 65, 66 y 67).

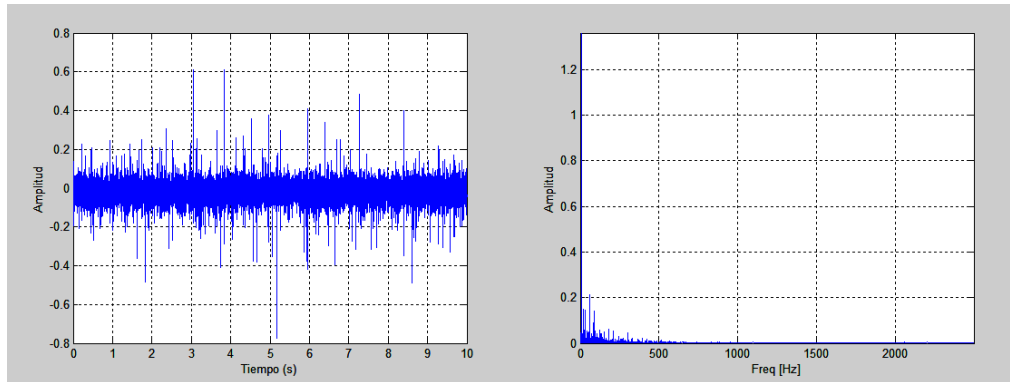


Ilustración 65 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 10 Hz

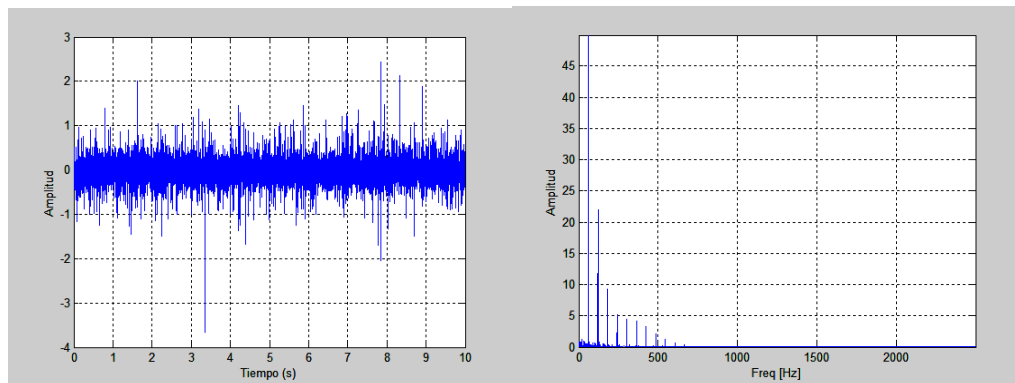


Ilustración 66 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 20 Hz

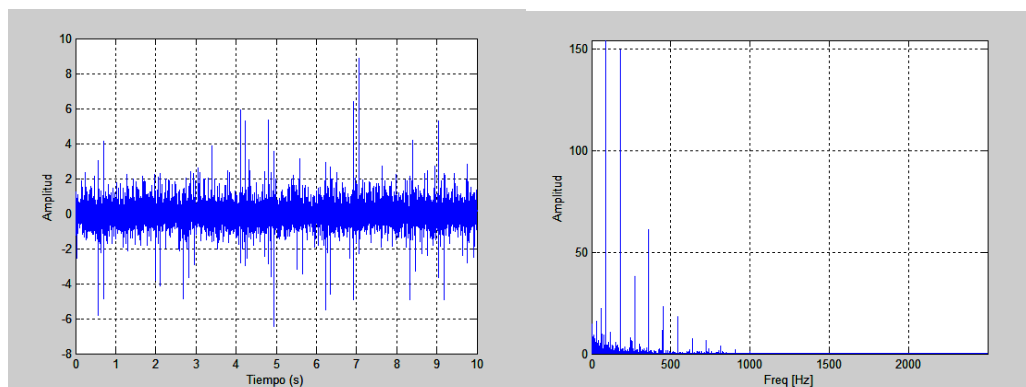


Ilustración 67 Rodamiento con defecto en pista externa girando a 30 Hz

Para las señales de 20 y 30 Hz puede distinguirse perfectamente las frecuencias naturales de defecto en pista externa a 60 y 90 Hz respectivamente. Este es exactamente

el resultado esperado. Sin embargo para la señal de 10 Hz el pico esperado a 30Hz no se muestra con tanta claridad, quedando otra vez demostrado, como ya adelantamos que el método se muestra más eficaz a mayor velocidad del eje.

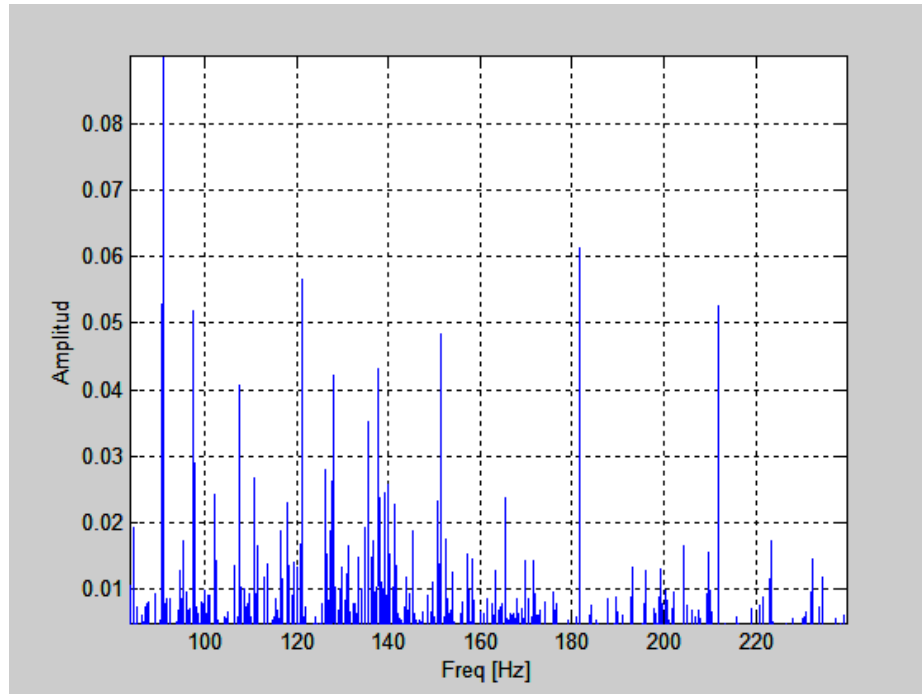


Ilustración 68 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista externa a 10 Hz

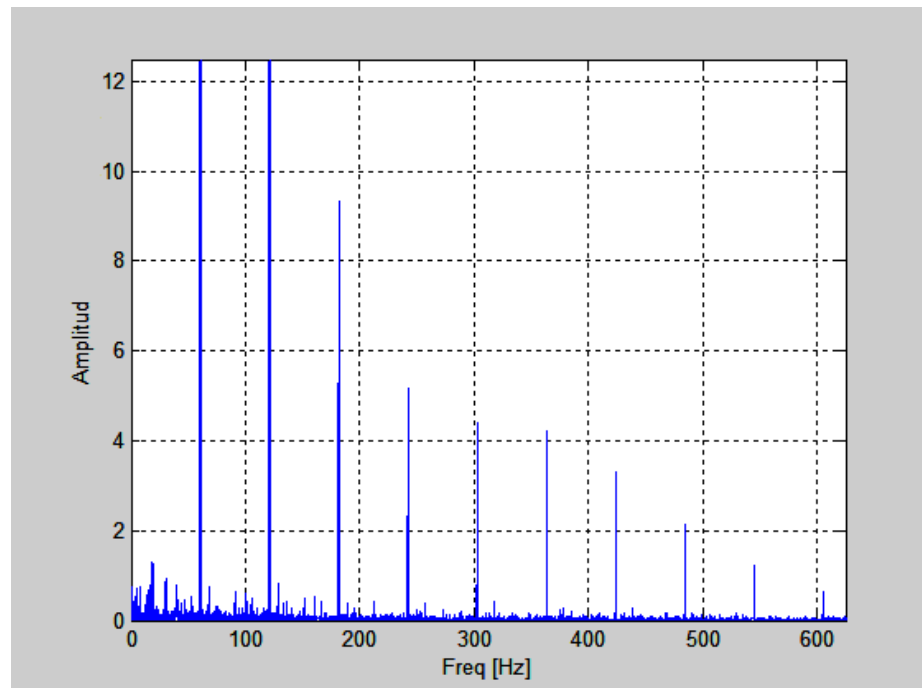


Ilustración 69 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista externa a 20 Hz

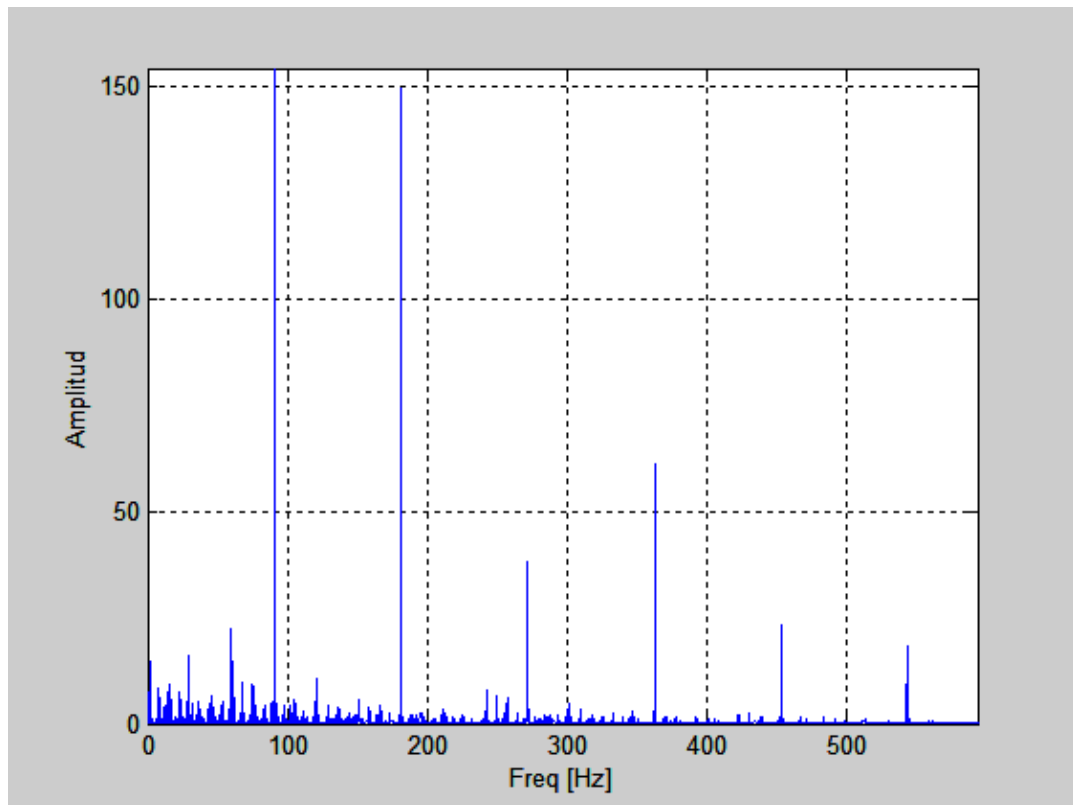


Ilustración 70 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en pista externa a 30 Hz

Volviendo a analizar los picos de frecuencia más significativos de la señal a 30 Hz obtenemos la tabla 15:

Frecuencia [Hz]	Significado
90,7	<i>BPFO</i>
181,3	2 <i>BPFO</i>
90,6	3 <i>FREQ MOTOR</i>
362,6	4 <i>BPFO</i>
272	3 <i>BPFO</i>

Tabla 15 Análisis de frecuencias O-30-50000-3

Puede identificarse claramente la *BPFO* así como sus sucesivos múltiplos.

4.2.2.5 CONCLUSSIONES DEL USO DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT.

Como primera conclusión puede extraerse que la transformada de Hilbert, aplicándole posteriormente la transformada de Fourier, se muestra como una herramienta mucho más potente que la representación temporal ya la transformada de

Fourier para el análisis frecuencial de señales de vibración. Básicamente lo que se está haciendo es un filtrado de la señal antes de obtener las frecuencias por Fourier.

Se observa además que, mediante esta transformada se obtienen mejores resultados cuanto mayor es la velocidad de giro del eje.

De este modo los resultados obtenidos aplicando la transformada de Hilbert son los que se recogen en tabla 16. Se ha calculado el error cometido al estimar la frecuencia de defecto, la amplitud del pico a dicha frecuencia y la posición que ocupa la amplitud de ese pico a lo largo de todo el espectro de frecuencias (el pico más alto de la señal ocupará la posición 1).

Defecto	Frecuenci de giro [Hz]	Frecuencia de defecto encontrada	Valor teórico	Error %	Amplitud	Posición
Bola	10	19,7	19,90399217	1,024881	0,056439	20
	20	39	39,80798434	2,029704	29,759	7
	30	59,2	59,71197651	0,85741	199,62	5
Pista interna	10	48,8	49,48342789	1,381125	4,2779	4
	20	97,7	98,96685578	1,280081	94,704	6
	30	147,3	148,4502837	0,774861	435,78	7
Pista externa	10	30,3	30,51657211	0,709687	0,14394	4
	20	60,5	61,03314422	0,873532	49,957	1
	30	90,7	91,54971633	0,928147	154,4	1

Tabla 16 Frecuencias encontradas mediante transformada de Hilbert

A la vista de estos resultados se observa que el método se muestra con mejor comportamiento para el rodamiento con defecto en pista externa. Desde el punto de vista de que el error cometido es menor que para cualquier otro de los casos.

Además, se confirma lo citado anteriormente. Cuando se reduce la velocidad del eje, empeoran los resultados. El caso que muestra este extremo es el del rodamiento con fallo en bola a velocidad de 10 Hz. Encontramos su frecuencia natural de defecto en la posición número 20.

En el peor de los casos el error cometido al estimar la frecuencia de defecto ha sido de un 2.03% con un promedio muy bajo de tan sólo 1.09%. Estos porcentajes de error tan bajos hacen pensar que los rodamientos empleados no presentan defectos incipientes sino con un cierto nivel de desarrollo.



4.3 CLASIFICADOR BASADO EN LÓGICA DIFUSA.

4.3.1 INTRODUCCIÓN.

En esta sección se desarrollará un programa basado en lógica difusa. Este programa tendrá la misión de concretar si el rodamiento sometido a estudio se trata de:

- Rodamiento en buenas condiciones.
- Rodamiento con defecto en bola.
- Rodamiento con defecto en pista externa.
- Rodamiento con defecto en pista interna.

Como en el procesamiento de la señal se obtuvieron mejores resultados para las señales de 30 Hz. Se ha decidido diseñar este clasificador, basándonos en las señales obtenidas a dicha frecuencia.

Para su funcionamiento, el programa se nutrirá de una serie de variables de entrada que consistirán en las 3 frecuencias, correspondientes a los 3 picos más altos de los espectros de frecuencia de las envolventes comprendidos entre 90 y 300 Hz. El motivo de coger los picos en este rango de frecuencias, es que, el parámetro que más nos compromete la clasificación es la frecuencia natural de fallo en pista interna (BPFI), al tratarse ésta del valor más alto. De esto se puede deducir que el patrón más reconocible para la identificación de los distintos tipos de rodamientos se encontrará entre lo 90 y los 300Hz. Es decir, aproximadamente entre BPFO y 2BPFI.

Tras su ejecución se obtendrán, como variables de salida, las probabilidades de que el rodamiento sometido a estudio pertenezca a uno u otro grupo.

Para la elaboración del programa clasificador, al igual que para el procesamiento de la señal, se ha empleado el programa de cálculo Matlab[®]. Este programa cuenta con un potente asistente para la elaboración de clasificadores difusos.

4.3.2 EDITOR DE CLASIFICADORES DIFUSOS (FIS EDITOR)

Este asistente se activa al introducir en Matlab[®] el comando “fuzzy”. Su manejo es bastante intuitivo y nos evita una programación compleja a la hora de desarrollar las

reglas difusas, las funciones de pertenencia, etc. Una vez introducido el citado comando aparece una ventana la que se representa en la ilustración 71.

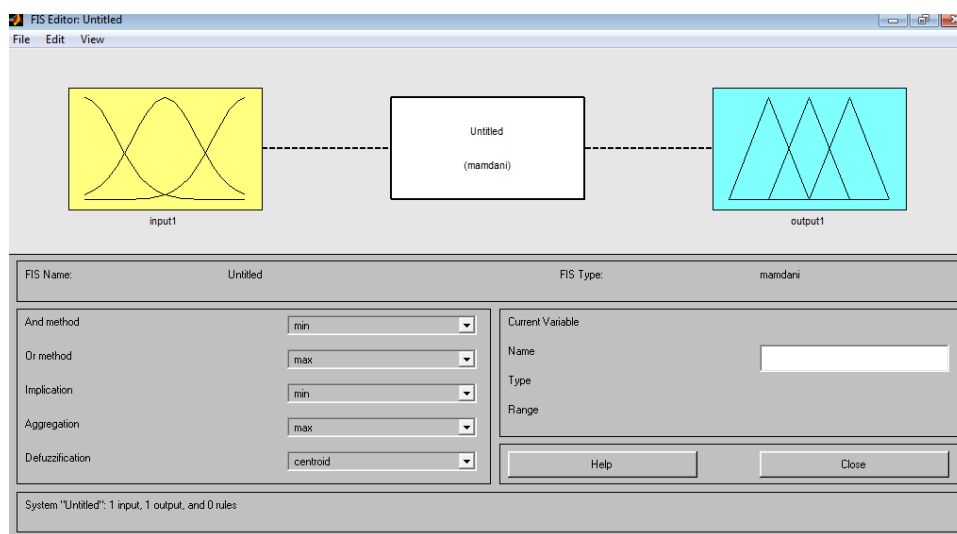


Ilustración 71 FIS EDITOR

En esta figura puede distinguirse, en la parte superior, un recuadro denominado “input 1”, que corresponde a la variable de entrada al sistema y un recuadro denominado “output 1” que corresponde a la variable de salida.

Nuestro programa contará con 3 variables de entrada que, como ya se dijo, serán, las 3 frecuencias, correspondientes a los 3 picos de frecuencia más significativos entre los 90 y los 300Hz, del espectro de frecuencias de la envolvente. Estas 3 variables de entrada recibirán los siguientes nombres:

- MAX1
- MAX2
- MAX3

Por otro lado nuestro clasificador tendrá 4 variables de salida correspondientes a los siguientes grupos.

- Rodamiento en buenas condiciones.
- Rodamiento con defecto en bola.
- Rodamiento con defecto en pista externa.
- Rodamiento con defecto en pista interna.

Para introducir una variable nueva, se despliega el menú “Edit” y da la posibilidad de seleccionar entre “Add input” o “Add output”, dependiendo de si lo que necesitamos es una variable de entrada o de salida. En el recuadro “Name” se puede incluir un nombre a las variables. Debajo de este recuadro el programa muestra el tipo de variable (si es de entrada o de salida) y el rango admisible de valores que puede tomar la misma. Este rango puede ser modificado y como hacerlo se explicará convenientemente en el apartado 4.3.3.

De tal manera que la pantalla *FIS EDITOR*, para el presente proyecto, tendrá aspecto de la ilustración 72:

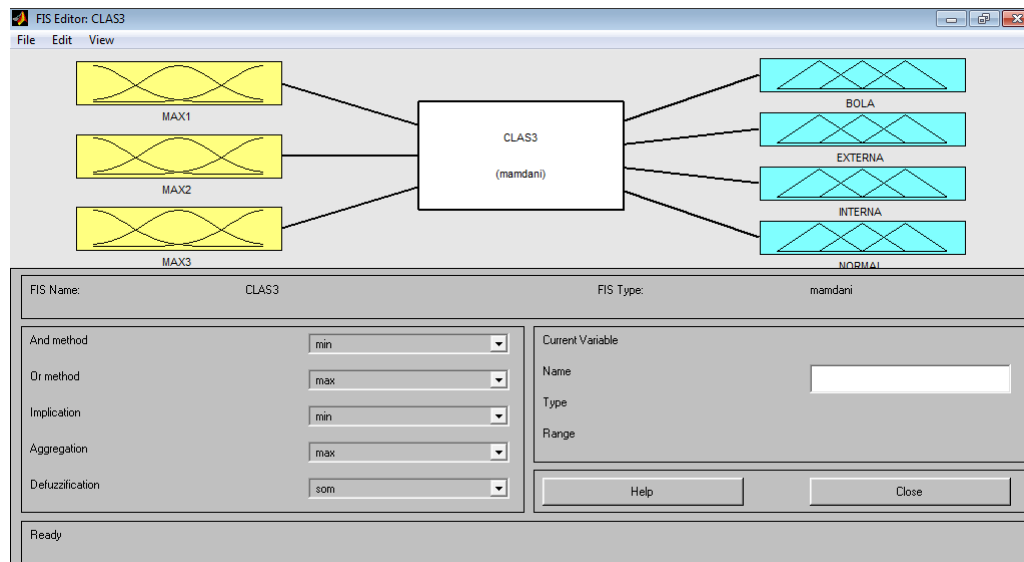


Ilustración 72 FIS EDITOR correspondiente al problema concreto del presente proyecto.

En la parte inferior izquierda de esta ventana aparecen una serie de parámetros que regula el comportamiento del sistema difuso, tales como: Método de agregación lógica, método de desfusión, etc. La elección de estos parámetros se llevará a cabo mediante la experiencia del usuario.

4.3.3 EDITOR DE FUNCIONES DE PERTENENCIA (*MEMBERSHIP FUNCTION EDITOR*)

Continuando con la programación del clasificador difuso, desplegamos el menú “View”, seleccionando la opción “Edit membership functions” [12].

La nueva ventana, que muestra el asistente, tiene el aspecto que presenta la ilustración 73, teniendo en cuenta que ya ha sido convenientemente modificada para el desarrollo de este proyecto.

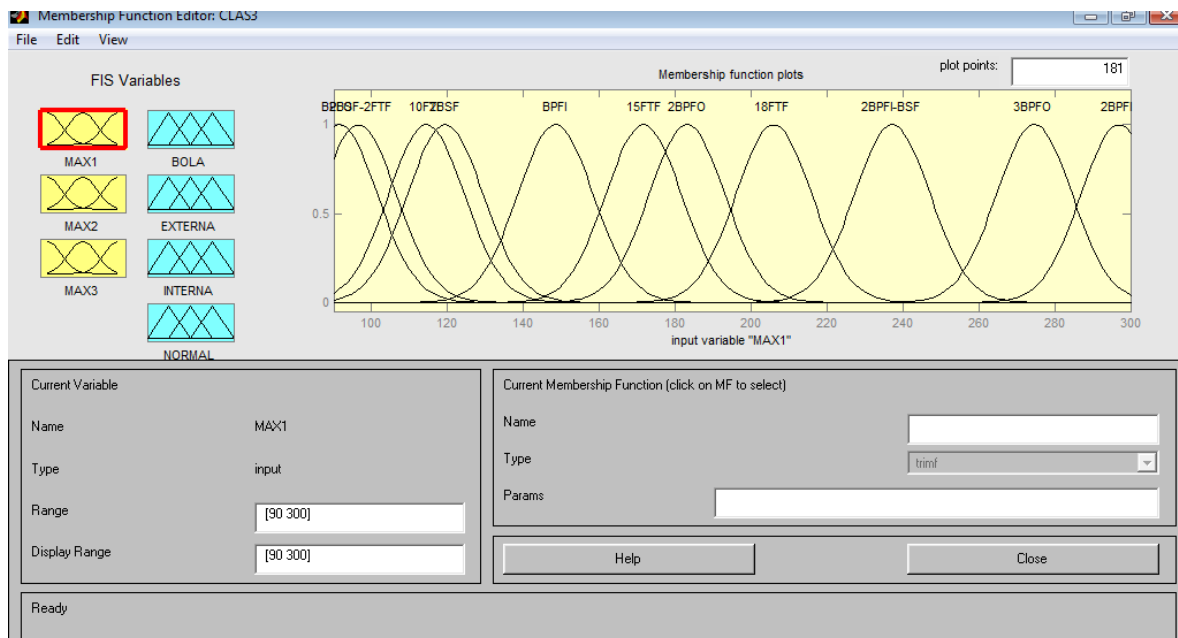


Ilustración 73 MEMBERSHIP FUNCTION EDITOR.

En esta nueva ventana se han introducido las funciones de pertenencia de los distintos conjuntos difusos. Para cada una de las variables de entrada, se propusieron los siguientes conjuntos difusos:

- BPFO
- 2BSF-2FTF
- 10FTF
- 2BSF
- BPFI
- 15FTF
- 2BPFO
- 18FTF
- 2BPFI-BSF
- 3BPFO
- 2BPFI o 4BSF

Por el contrario, las variables de salida presentan solamente un conjunto por variable.

En el procedimiento general para añadir funciones de pertenencia, se ha de seleccionar la variable deseada en la zona superior izquierda. Seguidamente en el menú

“Edit” se elegirá la opción “Add MFs” donde se podrá seleccionar el tipo de función y el número de funciones de ese tipo que se desea que aparezcan para esa variable [12]. Una vez creada se debe introducir el rango de valores permitidos para la función en el recuadro “Range”. Se podrá además nombrar a la función mediante el recuadro “Name”, así como cambiar su tipo a través del desplegable “type”. Los parámetros son los que dan la forma deseada a la función y su significado varía según el tipo de función que empleemos.

4.3.4 CREACIÓN DE FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LAS VARIABLES DE ENTRADA.

Para la creación de las funciones de pertenencia en las variables de entrada se partirá de la tabla 17, que contiene las frecuencias naturales de fallo comprendidas entre 90 y 300Hz o lo que es aproximadamente lo mismo entre BPFO y 2BPFI .

Frecuencia giro [Hz]	Significado
91,550	BPFO
96,537	2BSF-2FTF
114,437	10FTF
119,424	2BSF
148,450	BPFI
171,656	15FTF
183,099	2BPFO
205,987	18FTF
237,189	2BPFI-BSF
274,649	3BPFO
296,901	2BPFI o 4BSF

Tabla 17 Frecuencias naturales de fallo entre 90 y 300Hz

La forma elegida para las funciones de entrada, de entre las que ofrece el programa será una “gaussmf”, consistente en una Gaussiana. Esta función depende de dos parámetros σ y c , desviación típica y media respectivamente, y responde a la siguiente expresión matemática [12]:

$$f(x;\sigma,c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (39)$$

Para su programación en Matlab®, se utilizarán estos parámetros en el orden que indica el siguiente vector:

$$[\sigma \ c] \quad (40)$$

Como ejemplo para ilustrar cómo programar una función de este tipo en Matlab®, se mostrará la forma de proceder con una Gaussiana de desviación típica sea 2 y media 5 (ilustración 74) [12].

```
x=0:0.1:10;  
y=gaussmf(x,[2 5]);  
plot(x,y)
```

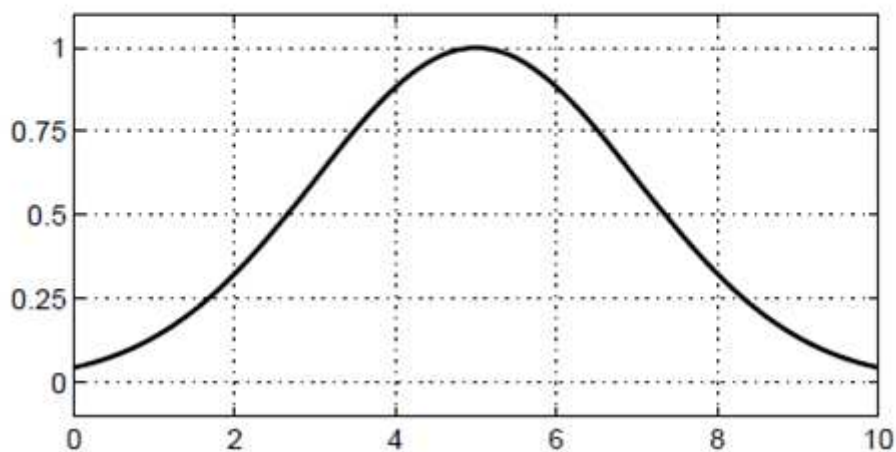


Ilustración 74 Gaussiana de desviación típica 2 y media 5

El rango que se va a fijar, como puede deducirse de todo lo anterior será de 90 a 300 [BPFO, 2BPFI].

Para ilustrar el procedimiento seguido para la creación de las funciones, se va a analizar el caso de la construcción de la función de pertenencia BPFI. Como se ha dicho la función será una Gaussiana de altura 1 (normalizada) y con su media centrada en la frecuencia BPFI, es decir, 148,45Hz. Por otro lado, la desviación típica tomará el valor 10. Este valor lo otorga el asistente al dividir el rango disponible de manera uniforme para cada una de las funciones de pertenencia (ilustración 75).

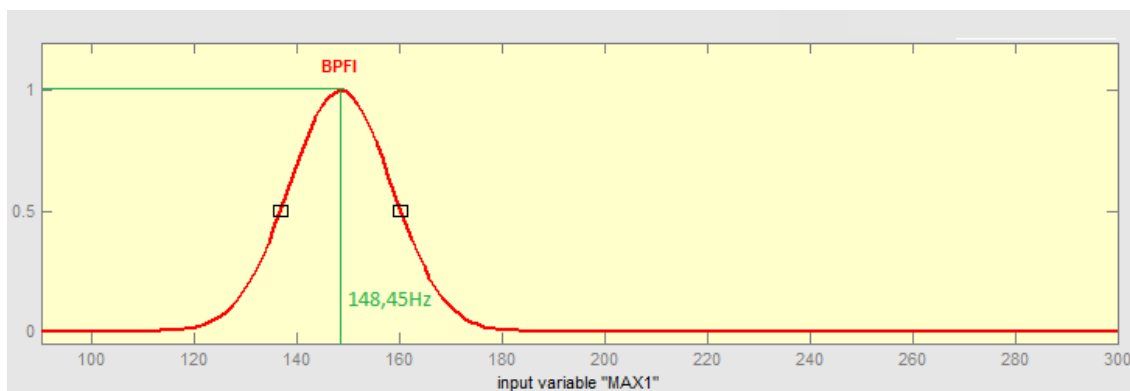


Ilustración 75 Creando la función de pertenencia BPFI

Este procedimiento se repetirá para cada uno de las frecuencias anteriormente citadas y para cada una de las variables de entrada. Tendremos por tanto para cada variable de entrada 11 funciones de pertenencia (ilustración 76).

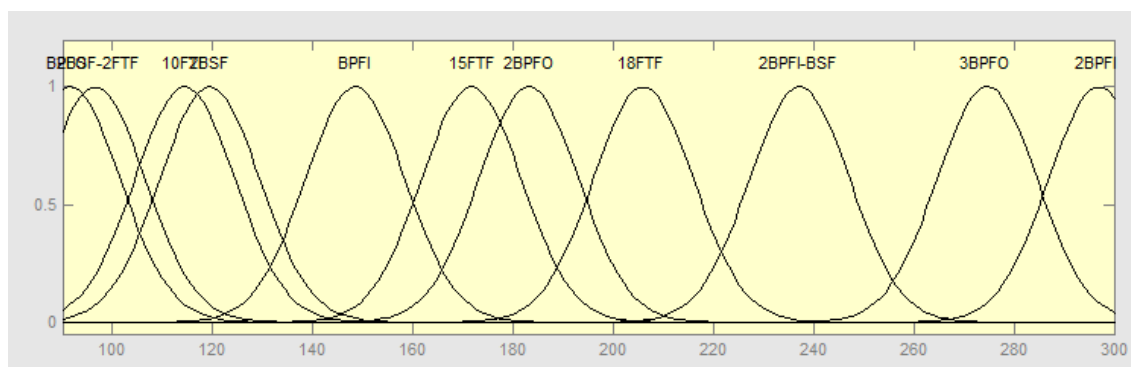


Ilustración 76 Variable MAX1 con todas sus funciones de pertenencia

4.3.5 CREACIÓN DE FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LAS VARIABLES DE SALIDA, AGREGACIÓN LÓGICA Y DESDIFUSIÓN.

Las variables de salida representan cada uno de los defectos estudiados así como la posibilidad de que el rodamiento se encuentre en buenas condiciones y, a diferencia de las de entrada, éstas tienen únicamente asociada una función de pertenencia.

Todas las funciones de pertenencia para las variables de salida tienen la misma forma. Dicha forma se muestra en la ilustración 77.

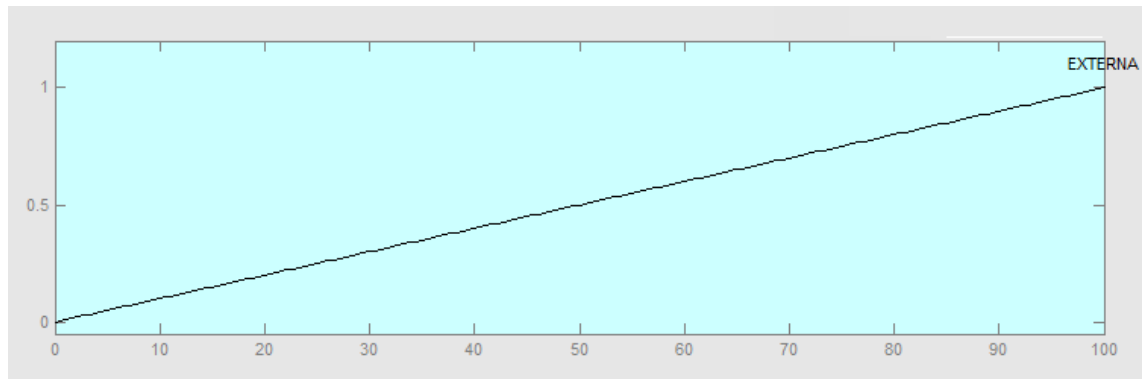


Ilustración 77 Función de pertenencia para la variable EXTERNA (% de fallo en pista externa)

Como se puede observar en la ilustración 77, el rango de todas las salidas está comprendido entre 0 y 100. Eso tiene mucho sentido, ya que las variables de salida expresan la probabilidad en porcentaje, de pertenencia a uno u otro grupo.

Además, se ha elegido esta forma de función, ya que si, por ejemplo, se entra a la gráfica con un valor 1 en el eje Y, se tendrá un 100% de probabilidad de que el rodamiento presente defecto en pista externa. Si por el contrario se entra con un valor de 0.5 en eje Y se obtendrá una probabilidad del 50% de presencia de fallo. El tipo de función escogido en el asistente es una “trimf”. Se trata de una función triangular que depende de tres parámetros escalares a , b y c . Matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera [12]:

$$f(x;a,b,c)=\left\{\begin{array}{ll} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{array}\right\} \quad (41)$$

O de manera más compacta:

$$f(x;a,b,c)=\max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a},\frac{c-x}{c-b}\right),0\right) \quad (42)$$

Los escalares a y c indican los “pies” del triángulo y el escalar b indica el pico del mismo. Como ejemplo, se va a analizar la construcción de una función triangular de parámetros $[3 \quad 6 \quad 8]$ [12].

```
y=trimf(x,[3 6 8]);  
plot(x,y)
```

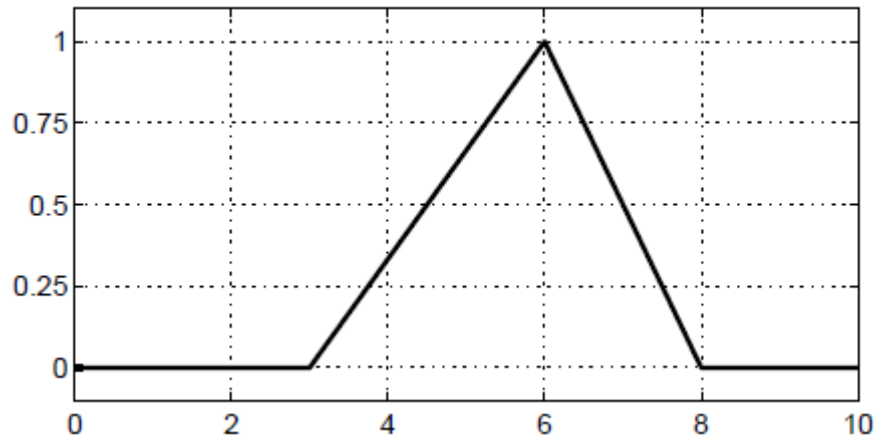


Ilustración 78 Triangular de escalares 3,6 y 8

La agregación es una unión lógica que se define como máximo o suma algebraica de los conjuntos de salida, obteniéndose así un conjunto de salida único, asociado a la variable de salida [14]. El método de agregación escogido ha sido el máximo que en Matlab[®] se denomina “max”.

Por otro lado, el método de desdifusión escogido ha sido “som”, consistente en comparar máximos. Tanto el método de agregación, como el de desdifusión, han sido elegidos mediante la experiencia del usuario, siendo los elegidos, los que mejores resultados arrojaban.

4.3.6 EDITOR DE REGLAS DIFUSAS (*RULE EDITOR*).

Una vez definidas todas las funciones de pertenencia, tanto para las variables de entrada como las de salida, es el momento de construir las reglas difusas que relacionen unas con otras. En el asistente, se accederá al editor de reglas difusas a través del menú “View”, en la opción “Edit rules”, que mostrará la ventana que se presenta en la ilustración 79.

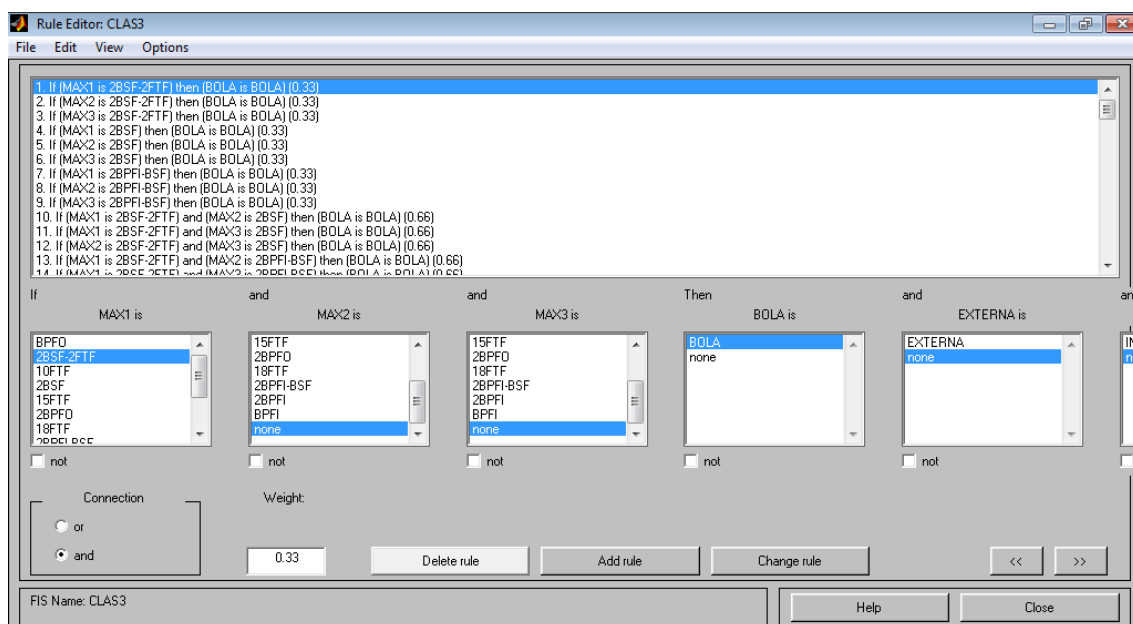


Ilustración 79 RULES EDITOR

En concreto se muestra el editor de reglas difusas correspondiente a nuestro problema concreto.

Mediante este asistente, la manera de introducir reglas difusas es bastante intuitiva. Se selecciona la función de pertenencia que se considere oportuna para cada una de las variables que se desean introducir en la regla. En la parte inferior izquierda, puede seleccionarse el operador lógico que relacionará las distintas variables dentro de la regla. Tras las variables de entrada aparecen las variables de salida. Si el programa tiene numerosas variables (como es el caso del presente problema), no caben todas en la misma ventana y se utilizan las flechas que aparecen en la parte inferior derecha del asistente para desplazarnos a izquierda y derecha. El asistente también posibilita la acción de seleccionar el conjunto complementario para cada función seleccionando la opción “Not”. El último aspecto de interés dentro de este editor es el peso que se le otorga a la regla difusa a través del recuadro “Weight” (abajo a la izquierda) [12]. El peso es la manera que se tiene de indicarle al programa que una regla es más o menos importante que otra. Esto se consigue otorgando a cada regla un porcentaje numérico. A mayor porcentaje mayor importancia tendrá la regla. Las reglas una vez introducidas aparecen en el recuadro superior.



Una vez explicado el funcionamiento del editor de reglas difusas se va a proceder a analizar la forma en la que se han concebido las reglas difusas para este problema concreto.

4.3.7 REGLAS DIFUSAS

Como mencionamos se ha decidido introducir las 3 frecuencias correspondientes a los picos más altos del espectro de frecuencia de envolvente de la señal, comprendidas en el intervalo [90,300] Hz, ya que este intervalo es el que muestra un patrón más reconocible para identificar los defectos en rodamientos.

Las reglas más simples consistirán en que una de estas 3 frecuencias coincida con alguna de las frecuencias naturales de fallo introducidas en el clasificador, de la siguiente manera:

SI (MAX1 es BPFO) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA) 0.33

Como es lógico pensar una regla tan simple no puede definir la condición del rodamiento totalmente, por este motivo el peso de este tipo de reglas será del 33% (0.33).

A medida que se incorporen más variables de entrada a la regla, el peso de la misma se irá incrementando, para dos variables el peso será del 66% (0.66) y finalmente para el caso en el que se identifiquen las 3 frecuencias de entrada, se tendrá un peso de regla del 100% (1). A continuación se muestran 2 ejemplos para ilustrar este incremento del peso en la regla:

SI (MAX1 es BPFO y MAX2 es 2BPFO) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA) 0.66

SI (MAX1 es BPFO y MAX2 es 2BPFO y MAX es 3BPFO) ENTONCES (EXTERNA es EXTERNA) 1



Las reglas difusas correspondientes al rodamiento en buenas condiciones, han visto incrementado su peso ya que este tipo de rodamiento es más difícil de reconocer, debido a que la FTF es considerablemente la menor de las frecuencias naturales de fallo.

En el anexo 3 de este proyecto, se encuentra un desglose con todas las reglas difusas programadas.

4.3.8 RESULTADOS OBTENIDOS CON EL CLASIFICADOR DIFUSO.

Una vez definido por completo el clasificador de lógica difusa, se procede a evaluar las distintas señales de vibración para analizar los resultados obtenidos. Para ello se han de ejecutar en Matlab® los siguientes comandos:

```
A = readfis('CLASIFICADOR DIFUSO');  
evalfis('nombre de los datos a analizar', A);
```

Esta orden devuelve el análisis de las variables introducidas que serán los porcentajes de pertenencia a cada uno de los grupos de rodamientos

También se puede evaluar señales a través del asistente para lógica difusa de Matlab®. Se accede mediante el menú “View”, en la opción “View rules”. Aparece la ventana que se muestra en la ilustración 80. En ella, mediante el recuadro “Input”, se puede introducir un vector que contenga las variables de entrada y en la parte superior derecha devuelve el valor de las variables de salida, que representan los porcentajes de pertenencia a cada uno de los grupos de rodamientos.

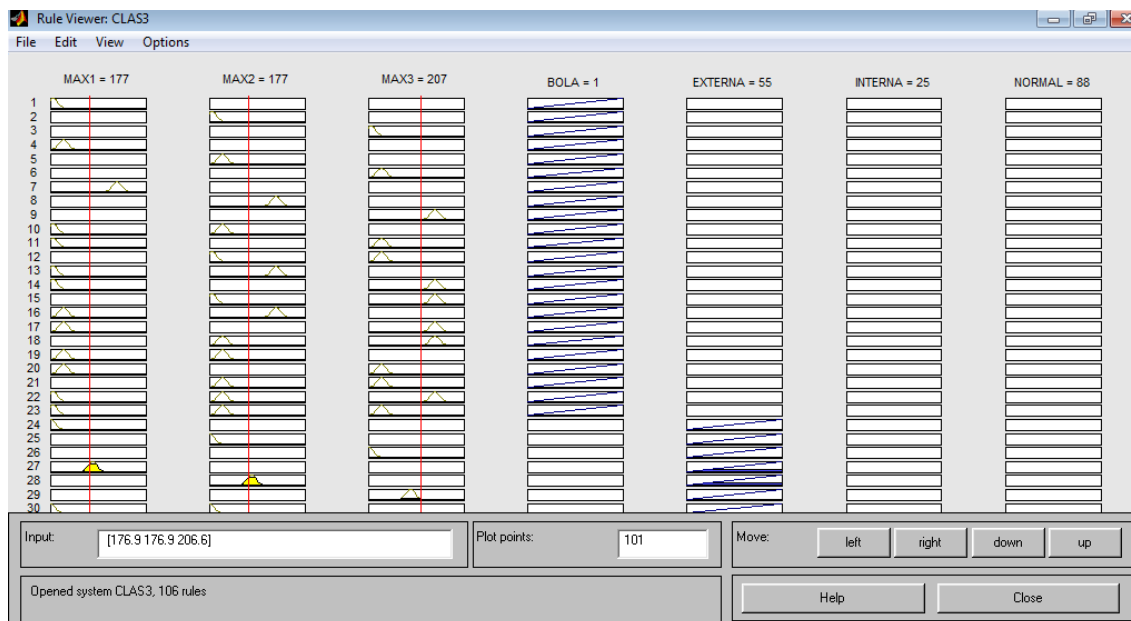


Ilustración 80 RULES VIEWER

Los resultados del análisis de cada señal se muestran en las tablas 18,19, 20 y

21.



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]	[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %
B-30-50000-1	95.7000 118.4000 236.9000	100 31 25 47
B-30-50000-2	118.4000 118.5000 236.9000	100 2 25 47
B-30-50000-3	95.7000 118.4000 236.9000	100 31 25 47
B-30-50000-4	95.7000 118.4000 118.5000	100 31 1 47
B-30-50000-5	95.7000 118.4000 236.9000	100 31 25 47
B-30-25000-1	95.8000 118.4000 236.8000	100 31 25 47
B-30-25000-2	95.6000 118.4000 236.8000	100 31 25 47
B-30-25000-3	95.8000 118.4000 236.8000	100 31 25 47
B-30-25000-4	95.6000 118.4000 236.8000	100 31 25 47
B-30-25000-5	95.8000 118.4000 236.8000	100 31 25 47
B-30-20000-1	95.5000 118.2500 236.5000	100 31 25 47
B-30-20000-2	118.2500 118.5000 236.7500	100 2 25 47
B-30-20000-3	95.5000 118.2500 236.5000	100 31 25 47
B-30-20000-4	95.5000 118.2500 141.0000	66 31 19 47
B-30-20000-5	95.7500 118.5000 236.7500	100 31 25 47
B-30-15000-1	95.6667 118.3333 236.3333	100 31 25 47
B-30-15000-2	95.6667 118.3333 236.6667	100 31 25 47
B-30-15000-3	95.6667 118.3333 236.6667	100 31 25 47
B-30-15000-4	95.6667 118.3333 236.3333	100 31 25 47
B-30-15000-5	118.0000 118.3333 236.3333	99 2 25 47
B-30-10000-1	95.5000 118.5000 237.0000	100 31 25 47
B-30-10000-2	96.0000 118.5000 237.0000	100 30 25 47
B-30-10000-3	95.5000 118.5000 237.0000	100 31 25 47
B-30-10000-4	95.5000 118.5000 237.0000	100 31 25 47
B-30-10000-5	95.5000 118.5000 237.0000	100 31 25 47
B-30-5000-1	118 119 237	99 2 25 47
B-30-5000-2	96 118 119	99 30 1 47
B-30-5000-3	96 118 119	99 30 1 47
B-30-5000-4	118 119 237	99 2 25 47
B-30-5000-5	96 118 237	99 30 25 47

Tabla 18 Resultados para el rodamiento con fallo en bola (30Hz)



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]	[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %
O-30-50000-1	90.6000 90.7000 181.3000	28 99 2 32
O-30-50000-2	90.6000 90.7000 181.3000	28 99 2 32
O-30-50000-3	90.6000 90.7000 181.3000	28 99 2 32
O-30-50000-4	90.6000 90.7000 181.3000	28 99 2 32
O-30-50000-5	90.7000 181.4000 272.0000	28 97 3 32
O-30-25000-1	90.6000 181.2000 272.0000	28 97 3 32
O-30-25000-2	90.6000 181.4000 272.0000	28 97 3 32
O-30-25000-3	90.6000 181.4000 272.0000	28 97 3 32
O-30-25000-4	90.6000 181.4000 272.0000	28 97 3 32
O-30-25000-5	90.6000 181.4000 272.0000	28 97 3 32
O-30-20000-1	90.5000 90.7500 181.2500	28 99 2 32
O-30-20000-2	90.7500 181.2500 272.0000	28 97 3 32
O-30-20000-3	90.5000 90.7500 181.2500	28 99 2 32
O-30-20000-4	90.5000 90.7500 181.2500	28 99 2 32
O-30-20000-5	90.5000 90.7500 181.2500	28 99 2 32
O-30-15000-1	90.6667 181.3333 272.0000	28 97 3 32
O-30-15000-2	90.6667 181.3333 272.0000	28 97 3 32
O-30-15000-3	90.6667 181.3333 272.0000	28 97 3 32
O-30-15000-4	90.6667 181.3333 272.0000	28 97 3 32
O-30-15000-5	90.6667 181.3333 272.0000	28 97 3 32
O-30-10000-1	90.5000 181.5000 272.0000	28 97 3 31
O-30-10000-2	90.5000 181.0000 272.0000	28 97 3 33
O-30-10000-3	90.5000 181.5000 272.0000	28 97 3 31
O-30-10000-4	90.5000 181.5000 272.0000	28 97 3 31
O-30-10000-5	90.5000 181.5000 272.0000	28 97 3 31
O-30-5000-1	90 179 269	27 86 2 39
O-30-5000-2	90 91 181	29 98 2 33
O-30-5000-3	91 181 272	29 97 3 33
O-30-5000-4	91 181 272	29 97 3 33
O-30-5000-5	90 91 181	29 98 2 33

Tabla 19 Resultados para el rodamiento con fallo en pista externa (30Hz)



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]	[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %
I-30-50000-1	147.3000 206.7000 294.5000	1 5 98 50
I-30-50000-2	147.2000 206.7000 294.5000	1 5 98 50
I-30-50000-3	147.3000 206.7000 294.5000	1 5 98 50
I-30-50000-4	147.2000 206.7000 235.0000	33 3 98 50
I-30-50000-5	147.3000 206.7000 294.5000	1 5 98 50
I-30-25000-1	147.2000 206.8000 235.0000	33 2 98 50
I-30-25000-2	147.2000 206.8000 294.6000	1 5 98 50
I-30-25000-3	119.0000 147.2000 235.0000	65 1 98 46
I-30-25000-4	119.0000 147.2000 235.0000	33 2 98 50
I-30-25000-5	147.2000 235.0000 294.4000	33 5 49 3
I-30-20000-1	147.2500 206.7500 294.5000	1 5 98 50
I-30-20000-2	119.0000 147.2500 206.7500	33 3 100 50
I-30-20000-3	147.2500 206.7500 235.0000	33 3 98 50
I-30-20000-4	119.0000 147.2500 206.7500	33 3 100 50
I-30-20000-5	147.2500 206.7500 294.5000	1 5 98 50
I-30-15000-1	147.3333 206.6667 235.0000	33 3 98 50
I-30-15000-2	119.0000 147.3333 206.6667	33 3 100 50
I-30-15000-3	119.0000 147.3333 206.6667	33 3 100 50
I-30-15000-4	147.3333 206.6667 235.0000	33 3 98 50
I-30-15000-5	119.0000 147.3333 206.6667	33 3 100 50
I-30-10000-1	119 147 235	65 1 98 46
I-30-10000-2	119 147 235	65 1 98 46
I-30-10000-3	119 147 235	65 1 98 46
I-30-10000-4	119 147 235	65 1 98 46
I-30-10000-5	119 147 235	65 1 98 46
I-30-5000-1	147 207 235	33 2 98 50
I-30-5000-2	119 147 235	65 1 98 46
I-30-5000-3	119 147 207	33 2 99 50
I-30-5000-4	119 147 207	33 2 99 50
I-30-5000-5	119 147 235	65 1 98 46

Tabla 20 Resultados para el rodamiento con fallo en pista interna (30Hz)



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
A-30-50000-1	176.9000	177.0000	294.5000	1	55	25	70
A-30-50000-2	176.9000	177.0000	294.5000	1	55	25	70
A-30-50000-3	177.0000	235.2000	294.5000	33	28	25	44
A-30-50000-4	176.9000	206.6000	294.5000	1	28	49	70
A-30-50000-5	176.9000	206.6000	294.5000	1	28	49	70
A-30-25000-1	174.6000	177.0000	206.6000	1	46	25	87
A-30-25000-2	177.0000	206.6000	294.4000	1	28	49	70
A-30-25000-3	174.6000	177.0000	206.6000	1	46	25	87
A-30-25000-4	177.0000	206.6000	294.4000	1	28	49	70
A-30-25000-5	177.0000	206.6000	294.6000	1	28	49	70
A-30-20000-1	177.0000	206.5000	294.5000	1	28	49	70
A-30-20000-2	174.7500	177.0000	294.5000	1	47	25	70
A-30-20000-3	176.7500	206.5000	294.5000	1	27	49	71
A-30-20000-4	177.0000	206.5000	294.5000	1	28	49	70
A-30-20000-5	177.0000	206.5000	294.5000	1	28	49	70
A-30-15000-1	174.6667	176.6667	294.3333	1	47	25	71
A-30-15000-2	117.0000	177.0000	294.3333	33	28	25	70
A-30-15000-3	174.6667	177.0000	294.3333	1	47	25	70
A-30-15000-4	176.6667	235.0000	294.3333	33	27	25	45
A-30-15000-5	177.0000	205.3333	294.3333	1	28	49	70
A-30-10000-1	177.0000	206.5000	294.0000	1	28	48	70
A-30-10000-2	177.0000	206.5000	294.0000	1	28	48	70
A-30-10000-3	177.0000	235.0000	263.5000	33	36	25	44
A-30-10000-4	117.5000	176.5000	177.0000	33	54	2	87
A-30-10000-5	90	117	294	54	33	24	49
A-30-5000-1	90	176	177	27	78	2	70
A-30-5000-2	176	177	235	33	52	25	70
A-30-5000-3	90	177	235	54	55	25	44
A-30-5000-4	91	117	177	57	55	1	70
A-30-5000-5	117	177	251	33	28	10	70

Tabla 21 Resultados para el rodamiento con fallo en buenas condiciones (30Hz)

A continuación se procede a estudiar la tasa de acierto de este clasificador, basado en la lógica difusa, para clasificar cada tipo de rodamiento obteniéndose los resultados de la tabla 22:



TIPO DE RODAMIENTO			
BOLA	EXTERIOR	INTERIOR	NORMAL
100%	100%	100%	90%

Tabla 22 Tasa de aciertos para el clasificador difuso para rodamientos a velocidad de 30 Hz

Como se puede apreciar se han obtenido unas tasas de acierto bastante elevadas a la hora de clasificar cada tipo de rodamiento. La menor de todas las tasas de acierto es para el rodamiento en buenas condiciones con un 90%. Si nos fijamos en la tabla de resultados correspondiente a ese tipo de rodamiento se puede observar que, lo que ocurre es que en contadas ocasiones el clasificador confunde un rodamiento normal con un rodamiento con fallo en bola o en la pista exterior. Por tanto, aunque en este pequeño porcentaje de las veces no se consiga identificar correctamente un rodamiento en buenas condiciones, se estará del lado de la seguridad.

4.4 CLASIFICADOR DIFUSO INDEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD

4.4.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se mencionó el clasificador difuso se diseñó utilizando las señales obtenidas a 30 Hz. Sin embargo, basándonos en la idea de comparar los picos más significativos del espectro de frecuencias con las expresiones analíticas de las frecuencias naturales de fallo, podemos mejorar el clasificador de tal forma que pueda ser utilizado para cualquier velocidad de giro del eje.

Observando las expresiones analíticas de las frecuencias de fallo, se aprecia que todas son lineales con la frecuencia de giro del eje y que, por tanto, es posible adimensionalizarlas tal y como se muestra en las ecuaciones (43), (44), (45) y (46).

$$\frac{FTF}{RPM} = \frac{1}{60} \left(\frac{1}{2} \right) \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad (43)$$

$$\frac{BPFI}{RPM} = \frac{1}{60} \left(\frac{Nb}{2} \right) \left(1 + \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad (44)$$

$$\frac{BPFO}{RPM} = \frac{1}{60} \left(\frac{Nb}{2} \right) \left(1 - \frac{Bd \cos \phi}{Pd} \right) \quad (45)$$

$$\frac{BSF}{RPM} = \frac{1}{60} \left(\frac{Pd}{2Bd} \right) \left(1 - \frac{(Bd^2 \cos^2 \phi)}{Pd^2} \right) \quad (46)$$

Basándonos en esto, se ha construido un clasificador muy similar al anterior con las mismas reglas difusas, mismas variables de entrada y de salida, pero modificando las funciones de pertenencia de las variables de entrada introduciendo en vez de las frecuencias de fallo propiamente dichas, los parámetros adimensionales que se muestran en la tabla 23.

Significado	Frecuencia Adimensionalizada
BPFO/RPM	3,051657211
(2BSF-2FTF)/RPM	3,217884131
10FTF/RPM	3,814571514
2BSF/RPM	3,980798434
BPFI/RPM	4,948342789
15FTF/RPM	5,721857271
2BPFO/RPM	6,103314422
18FTF/RPM	6,866228725
(2BPFI-BSF)/RPM	7,906286361
3BPFO/RPM	9,154971633
2BPFI/RPM	9,896685578

Tabla 23 Funciones de pertenencia para el clasificador independiente de la velocidad

En la ilustración 81, se puede observar como quedarían las funciones de pertenencia para cada una de las variables de entrada al clasificador.

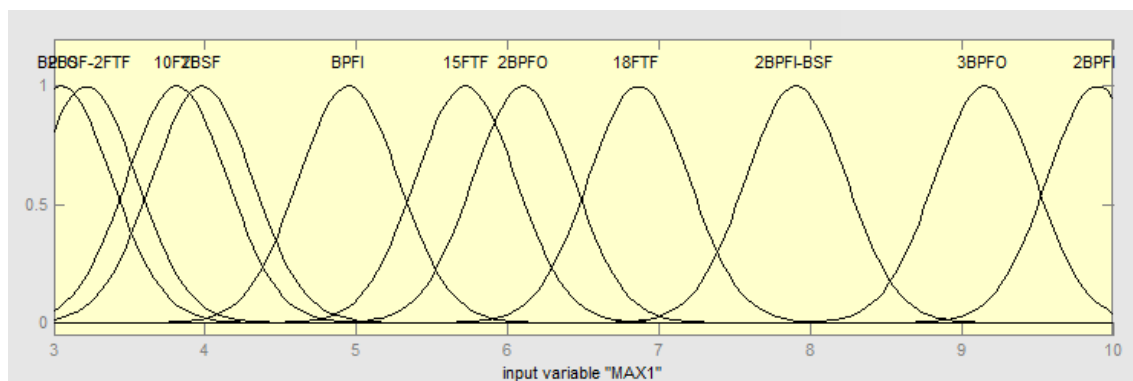


Ilustración 81 Funciones de pertenencia para el clasificador independiente de la velocidad



4.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez construido este segundo clasificador, se le vuelven a introducir las 3 frecuencias correspondientes a los tres picos más significativos (ahora adimensionalizadas) del espectro de frecuencias de la envolvente, con dos salvedades:

- Ahora estas tres frecuencias significativas habrá que dividir las entre la velocidad de giro del eje para poder introducirse al clasificador.
- Cuando se trataba con las señales de 30 Hz, se escogían estas tres frecuencias significativas entre los 90 y los 300 Hz, es decir, aproximadamente entre BPFO y 2BPFI. Por tanto ahora, cuando el clasificador se encuentre con señales de 20 y 10 Hz, se escogerán las variables de entrada de entre los rangos [60 200] y [30 100] Hz respectivamente.

De este modo los resultados obtenidos se recogen desde la tabla 24 hasta la 35.



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]	[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %
I-30-50000-1	4.9100 6.8900 9.8167	1 5 98 50
I-30-50000-2	4.9067 6.8900 9.8167	1 5 98 50
I-30-50000-3	4.9100 6.8900 9.8167	1 5 98 50
I-30-50000-4	4.9067 6.8900 7.8333	33 3 98 50
I-30-50000-5	4.9100 6.8900 9.8167	1 5 98 50
I-30-25000-1	4.9067 6.8933 7.8333	33 2 98 50
I-30-25000-2	4.9067 6.8933 9.8200	1 5 98 50
I-30-25000-3	3.9667 4.9067 7.8333	65 1 98 46
I-30-25000-4	4.9067 6.8933 7.8333	33 2 98 50
I-30-25000-5	4.9067 7.8333 9.8133	33 5 49 3
I-30-20000-1	4.9083 6.8917 9.8167	1 5 98 50
I-30-20000-2	3.9667 4.9083 6.8917	33 3 100 50
I-30-20000-3	4.9083 6.8917 7.8333	33 3 98 50
I-30-20000-4	3.9667 4.9083 6.8917	33 3 100 50
I-30-20000-5	4.9083 6.8917 9.8167	1 5 98 50
I-30-15000-1	4.9111 6.8889 7.8333	33 3 98 50
I-30-15000-2	3.9667 4.9111 6.8889	33 3 100 50
I-30-15000-3	3.9667 4.9111 6.8889	33 3 100 50
I-30-15000-4	4.9111 6.8889 7.8333	33 3 98 50
I-30-15000-5	3.9667 4.9111 6.8889	33 3 100 50
I-30-10000-1	3.9667 4.9000 7.8333	65 1 98 46
I-30-10000-2	3.9667 4.9000 7.8333	65 1 98 46
I-30-10000-3	3.9667 4.9000 7.8333	65 1 98 46
I-30-10000-4	3.9667 4.9000 7.8333	65 1 98 46
I-30-10000-5	3.9667 4.9000 7.8333	65 1 98 46
I-30-5000-1	4.9000 6.9000 7.8333	33 2 98 50
I-30-5000-2	3.9667 4.9000 7.8333	65 1 98 46
I-30-5000-3	3.9667 4.9000 6.9000	33 2 99 50
I-30-5000-4	3.9667 4.9000 6.9000	33 2 99 50
I-30-5000-5	3.9667 4.9000 7.8333	65 1 98 46

Tabla 24 Resultados para el rodamiento con fallo en pista interna (30Hz)



Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
B-30-50000-1	3.1900	3.9467	7.8967	100	31	25	47
B-30-50000-2	3.9467	3.9500	7.8967	100	2	25	47
B-30-50000-3	3.1900	3.9467	7.8967	100	31	25	47
B-30-50000-4	3.1900	3.9467	3.9500	100	31	1	47
B-30-50000-5	3.1900	3.9467	7.8967	100	31	25	47
B-30-25000-1	3.1933	3.9467	7.8933	100	31	25	47
B-30-25000-2	3.1867	3.9467	7.8933	100	31	25	47
B-30-25000-3	3.1933	3.9467	7.8933	100	31	25	47
B-30-25000-4	3.1867	3.9467	7.8933	100	31	25	47
B-30-25000-5	3.1933	3.9467	7.8933	100	31	25	47
B-30-20000-1	3.1833	3.9417	7.8833	100	31	25	47
B-30-20000-2	3.1833	3.9417	7.8833	100	2	25	47
B-30-20000-3	3.1833	3.9417	7.8833	100	31	25	47
B-30-20000-4	3.1833	3.9417	4.7000	66	31	19	47
B-30-20000-5	3.1917	3.9500	7.8917	100	31	25	47
B-30-15000-1	3.1889	3.9444	7.8778	100	31	25	47
B-30-15000-2	3.1889	3.9444	7.8889	100	31	25	47
B-30-15000-3	3.1889	3.9444	7.8889	100	31	25	47
B-30-15000-4	3.1889	3.9444	7.8778	100	31	25	47
B-30-15000-5	3.9333	3.9444	7.8778	99	2	25	47
B-30-10000-1	3.1833	3.9500	7.9000	100	31	25	47
B-30-10000-2	3.2000	3.9500	7.9000	100	30	25	47
B-30-10000-3	3.1833	3.9500	7.9000	100	31	25	47
B-30-10000-4	3.1833	3.9500	7.9000	100	31	25	47
B-30-10000-5	3.1833	3.9500	7.9000	100	31	25	47
B-30-5000-1	3.9333	3.9667	7.9000	99	2	25	47
B-30-5000-2	3.2000	3.9333	3.9667	99	30	1	47
B-30-5000-3	3.2000	3.9333	3.9667	99	30	1	47
B-30-5000-4	3.9333	3.9667	7.9000	99	2	25	47
B-30-5000-5	3.2000	3.9333	7.9000	99	30	25	47

Tabla 25 Resultados para el rodamiento con fallo en bola (30Hz)



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
O-30-50000-1	3.0200	3.0233	6.0433	28	99	2	32
O-30-50000-2	3.0200	3.0233	6.0433	28	99	2	32
O-30-50000-3	3.0200	3.0233	6.0433	28	99	2	32
O-30-50000-4	3.0200	3.0233	6.0433	28	99	2	32
O-30-50000-5	3.0233	6.0467	9.0667	28	97	3	32
O-30-25000-1	3.0200	6.0400	9.0667	28	97	3	32
O-30-25000-2	3.0200	6.0467	9.0667	28	97	3	32
O-30-25000-3	3.0200	6.0467	9.0667	28	97	3	32
O-30-25000-4	3.0200	6.0467	9.0667	28	97	3	32
O-30-25000-5	3.0200	6.0467	9.0667	28	97	3	32
O-30-20000-1	3.0167	3.0250	6.0417	28	99	2	32
O-30-20000-2	3.0250	6.0417	9.0667	28	97	3	32
O-30-20000-3	3.0167	3.0250	6.0417	28	99	2	32
O-30-20000-4	3.0167	3.0250	6.0417	28	99	2	32
O-30-20000-5	3.0167	3.0250	6.0417	28	99	2	32
O-30-15000-1	3.0222	6.0444	9.0667	28	97	3	32
O-30-15000-2	3.0222	6.0444	9.0667	28	97	3	32
O-30-15000-3	3.0222	6.0444	9.0667	28	97	3	32
O-30-15000-4	3.0222	6.0444	9.0667	28	97	3	32
O-30-15000-5	3.0222	6.0444	9.0667	28	97	3	32
O-30-10000-1	3.0167	6.0500	9.0667	28	97	3	31
O-30-10000-2	3.0167	6.0333	9.0667	28	97	3	33
O-30-10000-3	3.0167	6.0500	9.0667	28	97	3	31
O-30-10000-4	3.0167	6.0500	9.0667	28	97	3	31
O-30-10000-5	3.0167	6.0500	9.0667	28	97	3	31
O-30-5000-1	3.0000	5.9667	8.9667	27	86	2	39
O-30-5000-2	3.0000	3.0333	6.0333	29	98	2	33
O-30-5000-3	3.0333	6.0333	9.0667	29	97	3	33
O-30-5000-4	3.0333	6.0333	9.0667	29	97	3	33
O-30-5000-5	3.0000	3.0333	6.0333	29	98	2	33

Tabla 26 Resultados para el rodamiento con fallo en pista externa (30Hz)



Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
A-30-50000-1	5.8967	5.9000	9.8167	1	55	25	70
A-30-50000-2	5.8967	5.9000	9.8167	1	55	25	70
A-30-50000-3	5.9000	7.8400	9.8167	33	28	25	44
A-30-50000-4	5.8967	6.8867	9.8167	1	28	49	70
A-30-50000-5	5.8967	6.8867	9.8167	1	28	49	70
A-30-25000-1	5.9000	6.8867	9.8133	1	46	25	87
A-30-25000-2	5.8200	5.9000	6.8867	1	28	49	70
A-30-25000-3	5.8200	5.9000	6.8867	1	46	25	87
A-30-25000-4	5.9000	6.8867	9.8133	1	28	49	70
A-30-25000-5	5.9000	6.8867	9.8200	1	28	49	70
A-30-20000-1	5.9000	6.8833	9.8167	1	28	49	70
A-30-20000-2	5.8250	5.9000	9.8167	1	47	25	70
A-30-20000-3	5.8917	6.8833	9.8167	1	27	49	71
A-30-20000-4	5.9000	6.8833	9.8167	1	28	49	70
A-30-20000-5	5.9000	6.8833	9.8167	1	28	49	70
A-30-15000-1	5.8222	5.8889	9.8111	1	47	25	71
A-30-15000-2	3.9000	5.9000	9.8111	33	28	25	70
A-30-15000-3	5.8222	5.9000	9.8111	1	47	25	70
A-30-15000-4	5.8889	7.8333	9.8111	33	27	25	45
A-30-15000-5	5.9000	6.8444	9.8111	1	28	49	70
A-30-10000-1	5.9000	6.8833	9.8000	1	28	48	70
A-30-10000-2	5.9000	6.8833	9.8000	1	28	48	70
A-30-10000-3	5.9000	7.8333	8.7833	33	36	25	44
A-30-10000-4	3.9167	5.8833	5.9000	33	54	2	87
A-30-10000-5	3.0000	3.9000	9.8000	54	33	24	49
A-30-5000-1	3.0000	5.8667	5.9000	27	78	2	70
A-30-5000-2	5.8667	5.9000	7.8333	33	52	25	70
A-30-5000-3	3.0000	5.9000	7.8333	54	55	25	44
A-30-5000-4	3.0333	3.9000	5.9000	57	55	1	70
A-30-5000-5	3.9000	5.9000	8.3667	33	28	10	70

Tabla 27 Resultado para el rodamiento en buenas condiciones (30Hz)



Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
I-20-50000-1	4.8850	4.8900	6.8600	2	3	99	50
I-20-50000-2	3.9500	4.8850	4.8900	33	1	50	47
I-20-50000-3	3.9500	4.8850	4.8900	33	1	50	47
I-20-50000-4	3.9500	4.8850	4.8900	33	1	50	47
I-20-50000-5	3.9500	4.8850	4.8900	33	1	50	47
I-20-25000-1	3.9500	4.8900	6.8600	33	3	99	50
I-20-25000-2	3.9500	4.8900	6.8600	33	3	99	50
I-20-25000-3	3.9500	4.8900	6.8600	33	3	99	50
I-20-25000-4	3.9500	4.8900	6.8600	33	3	99	50
I-20-25000-5	3.9500	4.8900	6.8600	33	3	99	50
I-20-20000-1	3.9500	4.8875	6.8625	33	3	99	50
I-20-20000-2	3.9500	4.8875	6.8625	33	3	99	50
I-20-20000-3	3.9500	4.8875	6.8625	33	3	99	50
I-20-20000-4	3.9500	4.8875	6.8625	33	3	99	50
I-20-20000-5	3	3	3	27	66	1	3
I-20-15000-1	3.9500	4.8833	6.8667	33	3	99	50
I-20-15000-2	3.9500	4.8833	7.8000	63	1	96	47
I-20-15000-3	3.9500	4.8833	6.8667	33	3	99	50
I-20-15000-4	3.9500	4.8833	6.8667	33	3	99	50
I-20-15000-5	3.9500	4.8833	6.8667	33	3	99	50
I-20-10000-1	3.9500	4.8750	4.9000	33	1	49	47
I-20-10000-2	3.9500	4.8750	4.9000	33	1	49	47
I-20-10000-3	3.9500	4.8750	4.9000	33	1	49	47
I-20-10000-4	3.9500	4.8750	6.8500	33	3	98	50
I-20-10000-5	3.9500	4.8750	4.9000	33	1	49	47
I-20-5000-1	3.9500	4.9000	6.8500	33	3	99	50
I-20-5000-2	3.9500	4.9000	6.8500	33	3	99	50
I-20-5000-3	3.9500	4.9000	6.8500	33	3	99	50
I-20-5000-4	3.9500	4.9000	6.8500	33	3	99	50
I-20-5000-5	3.9500	4.9000	6.8500	33	3	99	50

Tabla 28 Resultados para el rodamiento con fallo en pista interna (20Hz)



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
O-20-50000-1	3.0250	6.0500	9.0800	28	98	3	31
O-20-50000-2	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-50000-3	3	3	3	27	66	1	3
O-20-50000-4	3.0250	6.0500	9.0800	28	98	3	31
O-20-50000-5	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-25000-1	3.0300	6.0500	9.0800	29	98	3	31
O-20-25000-2	3.0200	3.0300	6.0500	29	99	2	31
O-20-25000-3	3.0300	6.0500	9.0800	29	98	3	31
O-20-25000-4	3.0300	6.0500	9.0800	29	98	3	31
O-20-25000-5	3.0300	6.0500	9.0800	29	98	3	31
O-20-20000-1	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-20000-2	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-20000-3	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-20000-4	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-20000-5	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-15000-1	3.0167	3.0333	6.0500	29	99	2	31
O-20-15000-2	3.0167	3.0333	6.0500	29	99	2	31
O-20-15000-3	3.0167	3.0333	6.0500	29	99	2	31
O-20-15000-4	3.0167	3.0333	6.0500	29	99	2	31
O-20-15000-5	3.0167	3.0333	6.0500	29	99	2	31
O-20-10000-1	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-10000-2	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-10000-3	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-10000-4	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-10000-5	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-20-5000-1	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
O-20-5000-2	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
O-20-5000-3	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
O-20-5000-4	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
O-20-5000-5	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31

Tabla 29 Resultados para el rodamiento con fallo en pista externa (20Hz)



Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
B-20-50000-1	3.1450	3.8950	3.9000	97	32	1	49
B-20-50000-2	3.1450	3.9000	4.6550	65	32	17	49
B-20-50000-3	3.9000	3.9050	4.6550	65	3	17	49
B-20-50000-4	3.1450	3.9000	4.6550	65	32	17	49
B-20-50000-5	3.1450	3.8950	3.9000	97	32	1	49
B-20-25000-1	3.1400	3.8900	7.7800	94	32	24	49
B-20-25000-2	3.1400	3.8900	4.6500	64	32	17	49
B-20-25000-3	3.1400	3.8900	4.6500	64	32	17	49
B-20-25000-4	3.1400	3.8900	4.6500	64	32	17	49
B-20-25000-5	3.1400	3.8900	7.7800	94	32	24	49
B-20-20000-1	3.1375	3.8875	7.7750	93	32	24	49
B-20-20000-2	3.1375	3.8875	4.6375	64	32	17	49
B-20-20000-3	3.1250	3.8875	4.6375	64	33	17	49
B-20-20000-4	3.1250	3.8750	4.6375	63	33	17	50
B-20-20000-5	3.1250	3.8750	4.6250	63	33	16	50
B-20-15000-1	3.1500	3.9000	7.8167	97	32	25	49
B-20-15000-2	3.1500	3.9000	7.8000	96	32	24	49
B-20-15000-3	3.1500	3.9000	3.9167	98	32	1	49
B-20-15000-4	3.1500	3.9000	4.6667	65	32	18	49
B-20-15000-5	3.1500	3.9000	3.9167	98	32	1	49
B-20-10000-1	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49
B-20-10000-2	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49
B-20-10000-3	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49
B-20-10000-4	3.1500	3.9000	7.8000	96	32	24	49
B-20-10000-5	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49
B-20-5000-1	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49
B-20-5000-2	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49
B-20-5000-3	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49
B-20-5000-4	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49
B-20-5000-5	3.1500	3.9000	4.6500	65	32	17	49

Tabla 30 Resultados para el rodamiento con fallo en bolas (20Hz)



Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
A-20-50000-1	4.9050	5.8250	5.8500	1	47	25	75
A-20-50000-2	4.9050	5.8250	8.8550	2	45	25	48
A-20-50000-3	4.9050	5.8250	8.8550	2	45	25	48
A-20-50000-4	3.0000	4.9050	5.8250	27	47	25	48
A-20-50000-5	4.9050	5.8250	8.8550	2	45	25	48
A-20-25000-1	4.9000	5.8500	8.8300	2	42	25	47
A-20-25000-2	5.8500	8.8300	8.8600	1	45	2	47
A-20-25000-3	5.8200	5.8500	8.8300	1	47	2	75
A-20-25000-4	4.9000	8.8300	8.8600	2	23	25	3
A-20-25000-5	4.9000	5.8200	5.8500	1	47	25	75
A-20-20000-1	4.9000	5.8500	8.8300	2	42	25	47
A-20-20000-2	4.9000	7.8750	8.8600	33	23	50	3
A-20-20000-3	3.0000	4.9000	5.8250	27	47	25	48
A-20-20000-4	3.8875	5.8500	8.8250	32	41	3	75
A-20-20000-5	4.9000	5.8250	9.7600	1	24	46	48
A-20-15000-1	4.9000	5.8500	8.8333	2	42	25	47
A-20-15000-2	3.0000	3.8833	4.9000	54	33	25	49
A-20-15000-3	3.9000	4.9000	5.8167	33	23	25	77
A-20-15000-4	4.9000	5.8500	7.8333	33	25	49	47
A-20-15000-5	3.8833	4.9000	6.7500	32	6	95	49
A-20-10000-1	4.9000	5.8250	7.8500	33	24	50	48
A-20-10000-2	3.0000	4.9000	5.8250	27	47	25	48
A-20-10000-3	4.9000	5.8250	6.8000	1	24	50	77
A-20-10000-4	4.9000	5.8500	7.8750	33	25	50	47
A-20-10000-5	3.0000	5.8250	7.8500	54	47	25	48
A-20-5000-1	3.0000	3.2000	3.9000	65	60	1	49
A-20-5000-2	5.8500	6.8000	7.8500	33	25	50	75
A-20-5000-3	5.8000	8.8500	9.7500	1	44	23	49
A-20-5000-4	3.0000	3.0500	4.9000	30	66	25	4
A-20-5000-5	3.0000	4.9000	8.8500	27	44	25	4

Tabla 31 Resultados para el rodamiento en buenas condiciones (20Hz)



Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
I-10-50000-1	4.8800	7.7900	9.7600	32	7	48	3
I-10-50000-2	3.9400	4.8800	9.7700	33	6	47	47
I-10-50000-3	4.8800	4.8900	9.7700	2	6	49	4
I-10-50000-4	4.8900	6.8600	9.7700	1	6	93	50
I-10-50000-5	4.8900	6.8600	9.7700	1	6	93	50
I-10-25000-1	3.9400	4.8800	7.7800	62	1	94	47
I-10-25000-2	3.9400	4.8800	9.7600	33	7	46	47
I-10-25000-3	3.9400	4.8800	7.7800	62	1	94	47
I-10-25000-4	3.9400	4.8800	9.7600	33	7	46	47
I-10-25000-5	3.9400	4.8800	6.8600	33	3	98	50
I-10-20000-1	3.9250	4.8500	9.7250	33	8	44	48
I-10-20000-2	3.9250	4.8500	6.8250	33	4	96	50
I-10-20000-3	3.9250	4.8500	9.7250	33	8	44	48
I-10-20000-4	4.8750	7.7750	9.7500	31	7	47	2
I-10-20000-5	3.9250	4.8500	9.7250	33	8	44	48
I-10-15000-1	3.9333	4.8667	9.7000	33	9	42	47
I-10-15000-2	3.9333	4.8667	6.8333	33	3	98	50
I-10-15000-3	3.9333	4.8667	9.7000	33	9	42	47
I-10-15000-4	3.9333	4.8667	9.7000	33	9	42	47
I-10-15000-5	3.9333	4.8667	6.8333	33	3	98	50
I-10-10000-1	4.8500	7.7500	9.7000	30	9	45	3
I-10-10000-2	4.8500	6.8000	9.7000	2	9	84	50
I-10-10000-3	3.9000	4.8500	9.7000	33	9	42	49
I-10-10000-4	4.8500	6.8000	9.7000	2	9	84	50
I-10-10000-5	4.8500	6.8000	9.7000	2	9	84	50
I-10-5000-1	4.9000	6.8000	9.7000	1	9	84	50
I-10-5000-2	4.9000	6.8000	9.7000	1	9	84	50
I-10-5000-3	3.9000	4.8000	6.8000	33	4	91	50
I-10-5000-4	3.0000	3.9000	4.8000	54	33	23	49
I-10-5000-5	4.8000	4.9000	9.7000	2	9	46	3

Tabla 32 Resultados para el rodamiento con fallo en pista interna (10 Hz)



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
O-10-50000-1	3.0300	6.0500	6.0600	29	99	2	48
O-10-50000-2	3.0300	6.0600	9.0800	29	98	3	30
O-10-50000-3	3.0300	6.0500	9.0800	29	98	3	31
O-10-50000-4	3.0300	6.0500	9.0800	29	98	3	31
O-10-50000-5	3.0300	6.0600	9.0900	29	99	3	30
O-10-25000-1	3.0200	6.0400	8.0800	56	65	22	32
O-10-25000-2	3.4200	6.0400	9.0600	28	64	3	40
O-10-25000-3	3.0200	6.0400	9.0600	28	97	3	32
O-10-25000-4	3.0200	6.0400	9.0600	28	97	3	32
O-10-25000-5	3.0200	3.0600	6.0400	30	99	2	32
O-10-20000-1	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-10-20000-2	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-10-20000-3	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-10-20000-4	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-10-20000-5	3.0250	6.0500	9.0750	28	98	3	31
O-10-15000-1	3	3	3	27	66	1	3
O-10-15000-2	3.0333	6.0333	9.0667	29	97	3	33
O-10-15000-3	3.0333	6.0333	9.0667	29	97	3	33
O-10-15000-4	3.0333	6.0333	9.0667	29	97	3	33
O-10-15000-5	6.0333	6.1000	9.0667	1	65	3	43
O-10-10000-1	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
O-10-10000-2	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
O-10-10000-3	3.0000	6.0500	9.1000	27	99	3	31
O-10-10000-4	3.0500	5.0500	6.0500	30	66	24	31
O-10-10000-5	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
O-10-5000-1	3.0000	6.0000	6.1000	27	96	2	43
O-10-5000-2	5.0000	6.1000	8.8000	1	38	25	27
O-10-5000-3	6.0000	6.1000	9.1000	1	66	3	43
O-10-5000-4	5.0000	6.0000	9.1000	1	63	25	36
O-10-5000-5	4.8000	4.9000	5.8000	2	22	46	49

Tabla 33 Resultados para el rodamiento con fallo en la pista externa (10Hz)



Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
B-10-50000-1	3.6400	4.0100	4.3900	45	7	7	44
B-10-50000-2	3.6100	3.6300	3.6700	51	15	1	46
B-10-50000-3	3.2000	5.0900	7.6600	51	30	39	14
B-10-50000-4	3.6300	4.3800	7.6400	49	8	24	43
B-10-50000-5	3.6500	4.0200	7.7100	62	7	22	45
B-10-25000-1	3.5800	3.6800	3.7000	56	12	1	48
B-10-25000-2	3.6000	3.9800	4.2000	54	9	3	45
B-10-25000-3	3.5800	3.6200	4.3800	49	16	6	43
B-10-25000-4	3.4800	3.5600	4.3000	46	21	4	38
B-10-25000-5	3.5000	4.2200	4.2600	70	14	5	32
B-10-20000-1	3.6750	3.7250	4.1000	50	9	1	49
B-10-20000-2	3.6750	3.7000	4.4500	44	10	9	48
B-10-20000-3	3.6750	4.4250	7.7750	44	6	30	46
B-10-20000-4	3.0000	3.7000	8.4500	47	33	7	48
B-10-20000-5	3.6250	3.6750	3.7000	48	12	1	48
B-10-15000-1	3.6667	4.0333	7.7333	65	7	22	46
B-10-15000-2	3.6667	4.1000	7.7000	65	7	21	46
B-10-15000-3	3.6333	3.6667	4.3000	47	13	4	46
B-10-15000-4	3.6000	3.6667	3.7000	52	13	1	48
B-10-15000-5	3.6667	4.0333	7.7667	65	7	23	46
B-10-10000-1	3.6500	4.0000	4.0500	65	7	1	45
B-10-10000-2	3.0500	3.2000	3.3000	33	60	1	16
B-10-10000-3	3.6500	4.0500	7.7000	62	7	21	45
B-10-10000-4	3.3000	4.0500	7.8000	96	26	24	39
B-10-10000-5	3.6500	4.4000	7.8000	46	7	26	45
B-10-5000-1	3.0000	4.0000	4.4000	54	33	7	43
B-10-5000-2	3.0000	4.1000	7.7000	81	33	21	35
B-10-5000-3	3.0000	4.0000	7.6000	66	33	17	43
B-10-5000-4	3.0000	3.7000	7.3000	47	33	11	48
B-10-5000-5	3.1000	4.3000	8.0000	64	33	25	18

Tabla 34 Resultados para el rodamiento con fallo en bola (10Hz)



Señal	[MAX1 MAX2 MAX3] [Hz]			[BOLA EXTERNA INTERNA NORMAL] %			
A-10-50000-1	3.0600	5.4600	6.0500	30	66	8	50
A-10-50000-2	3.0600	5.4600	6.0500	30	66	8	50
A-10-50000-3	3.0600	5.4600	6.0500	30	66	8	50
A-10-50000-4	3.0600	6.0400	6.0500	30	99	2	50
A-10-50000-5	3.0600	6.0400	6.0500	30	99	2	50
A-10-25000-1	3.0600	5.4600	6.0400	30	65	8	51
A-10-25000-2	3.0600	5.4600	6.0400	30	65	8	51
A-10-25000-3	3.0600	5.4600	6.0400	30	65	8	51
A-10-25000-4		3	3 3	27	66	1	3
A-10-25000-5	3.0600	6.0400	6.0800	30	99	2	45
A-10-20000-1	3.0500	6.0500	8.3000	33	66	13	31
A-10-20000-2	3.0500	6.0500	7.8500	59	66	25	31
A-10-20000-3	3.0750	6.0500	8.3000	33	66	13	31
A-10-20000-4	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
A-10-20000-5	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
A-10-15000-1	3.0667	6.0333	6.0667	30	98	2	47
A-10-15000-2	3.0667	6.0333	6.0667	30	98	2	47
A-10-15000-3	3.0000	3.0667	6.0333	30	98	2	33
A-10-15000-4	3.0000	3.2667	6.0333	33	82	2	33
A-10-15000-5	5.4667	6.0333	6.0667	1	65	8	52
A-10-10000-1	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
A-10-10000-2	3.0500	6.0000	6.0500	30	96	2	50
A-10-10000-3	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
A-10-10000-4	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
A-10-10000-5	3.0000	3.0500	6.0500	30	99	2	31
A-10-5000-1	3.0000	6.0000	6.1000	27	96	2	43
A-10-5000-2	3.0000	4.3000	6.0000	42	63	4	36
A-10-5000-3	3.0000	5.2000	5.9000	27	55	19	44
A-10-5000-4	3.0000	6.0000	6.1000	27	96	2	43
A-10-5000-5	3.0000	6.0000	6.1000	27	96	2	43

Tabla 35 Resultado para el rodamiento en buenas condiciones (10Hz)

A la vista de los resultados obtenidos, las tasas de acierto para la identificación de cada tipo de rodamiento y para cada velocidad han sido las que se presentan en las tablas 36, 37 y 38:



TIPO DE RODAMIENTO			
BOLA	EXTERIOR	INTERIOR	NORMAL
100%	100%	100%	90%

Tabla 36 Tasas de acierto para el rodamiento a 30 Hz

TIPO DE RODAMIENTO			
BOLA	EXTERIOR	INTERIOR	NORMAL
100%	100%	97%	63%

Tabla 37 Tasas de acierto para el rodamiento a 20 Hz

TIPO DE RODAMIENTO			
BOLA	EXTERIOR	INTERIOR	NORMAL
83%	97%	67%	0%

Tabla 38 Tasas de acierto para el rodamiento a 10 Hz

Como se puede apreciar las tasas de acierto van decreciendo a medida que disminuye la velocidad del eje. Esto era previsible ya que, durante el procesamiento de la señal, se vio como a medida que aumentaba la frecuencia del eje se percibían mejor los fallos en los rodamientos. No obstante las tasas de acierto son bastante elevadas para todos los casos, salvo para la identificación de rodamientos en buenas condiciones a velocidad de 10Hz. A pesar de este mal resultado, al estar clasificando rodamientos en buenas condiciones como defectuosos, nos encontramos del lado de la seguridad.



4.5 DESARROLLO DE UN INTERFAZ GRÁFICO PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS

4.5.1 INTRODUCCIÓN

Como colofón a este proyecto se ha decidido diseñar una aplicación con un entorno gráfico, para que cualquier operario que trabaje en una fábrica en labores de mantenimiento, sin necesidad de más conocimientos, pueda determinar si un rodamiento presenta defecto y donde lo hace. Por tanto dentro de este apartado, se realizará un interfaz gráfico de usuario, al que nos referiremos como GUI que es como se normalmente se conocen este tipo de interfaces.

4.5.2 DISEÑO DE UNA GUI

Antes de empezar a programar es imprescindible hablar con el usuario final de la GUI. Es importantísimo entender cuáles son las necesidades exactas que tiene que cubrir la aplicación. Para ello es necesario entender el tipo de datos y variables que son introducidas por el usuario, así como las excepciones que puedan producirse. También es necesario saber cómo quiere el cliente que se presenten los datos.

La parte del diseño es, con mucha diferencia, la más importante desde el punto de vista del usuario y por tanto también lo es desde el punto de vista empresarial. Para diseñar correctamente una GUI, lo mejor es hacer un borrador con papel y lápiz. Presentar un boceto al cliente y mejorarlo con él es la mejor opción. De esta manera se consigue que no haya sorpresas y se evita el encarecimiento económico y temporal de los proyectos. Además se consigue que el cliente se implique en el proyecto poniendo su talento y sus preferencias en la herramienta que al final usará él mismo.

Una vez que se tiene claro qué objetos tendrá la GUI, es necesario hacer un programa de tipo “script” que tenga la misma funcionalidad que la GUI que se quiere programar. Antes de incorporar el programa a la GUI, es necesario hacer todo tipo de pruebas con él hasta que se esté completamente seguro de que el programa que se va a incorporar en la GUI es el programa apropiado. Una vez que se tenga el “script” guardado se pueden incorporar las distintas trozos del script en la GUI, de modo que al

hacer las pruebas sobre la GUI se puedan contrastar los resultados con los que se obtuvieron del script.

Para crear una GUI sencilla primero se ha de llamar a la ventana de comandos de Matlab®. Una vez en ella se selecciona “File →New→GUI”, tal y como se muestra en la ilustración 82 [17]:

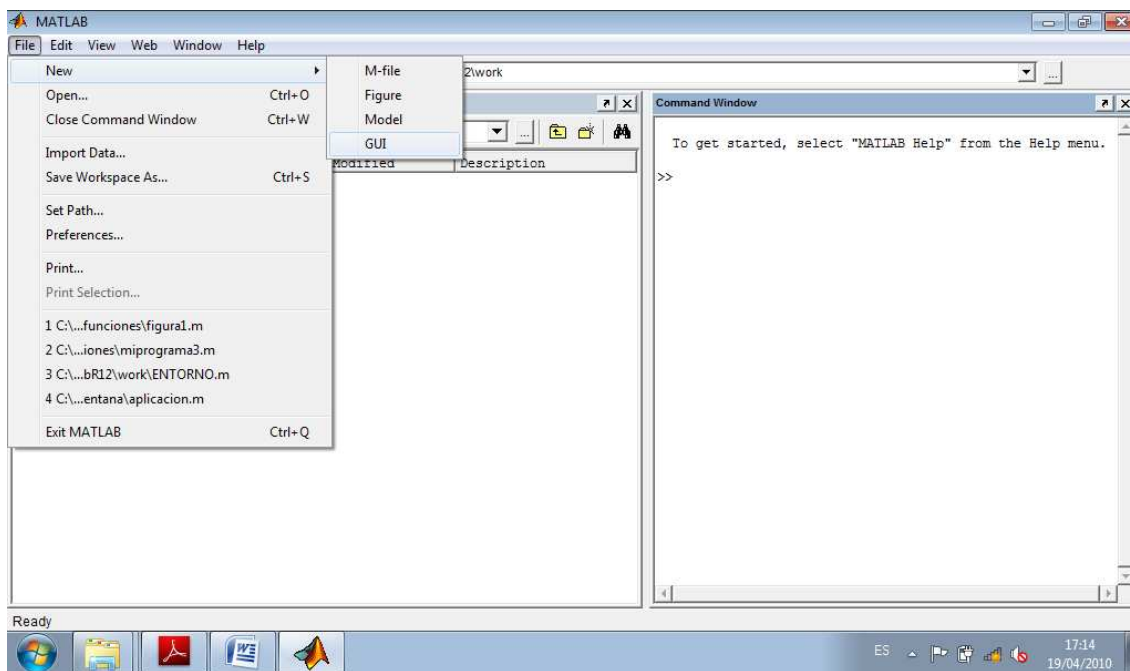


Ilustración 82 Creación de una nueva GUI

La ventana que aparece tiene el aspecto de la ilustración 83. Lo primero que se debe hacer es guardar la GUI en blanco creada, en nuestro caso, la GUI se ha bautizado con el nombre de “figura1”.

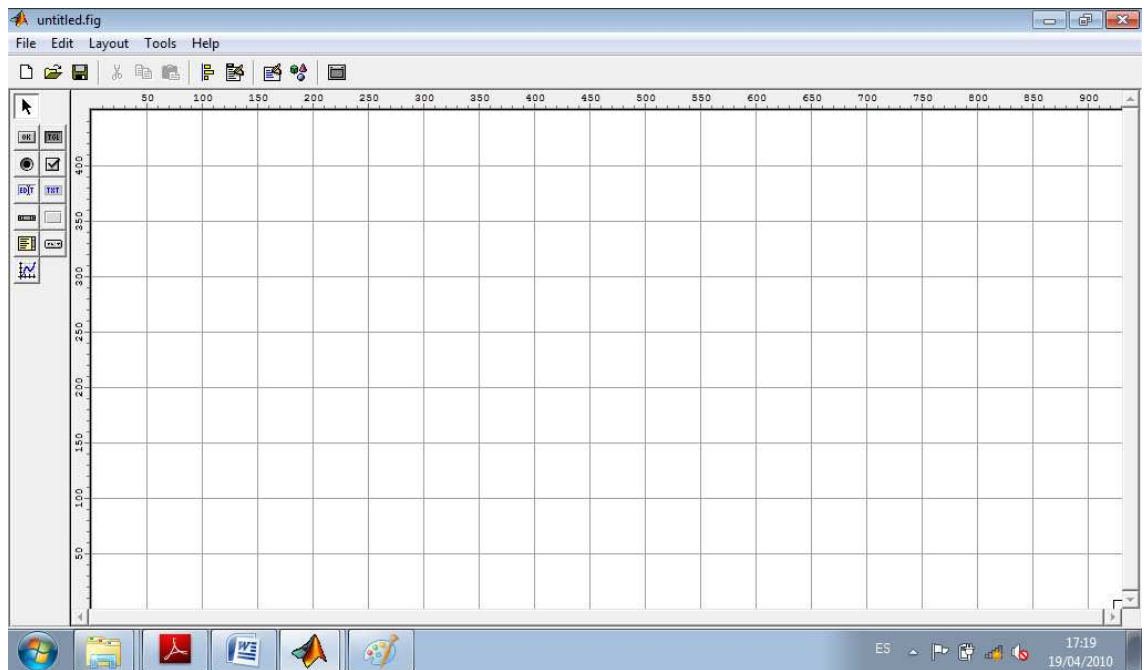


Ilustración 83 GUI en blanco

Una cuestión muy importante es, que al guardar la interfaz en el mismo comienzo, aparecen unos archivos nuevos en el directorio elegido. Un archivo será “figura1.fig” y el otro será “figura1.m” (ilustración 84). Antes de comenzar a manipularlos es conveniente observarlos, para ver las diferencias que se van a ir produciendo a medida que se vayan introduciendo elementos dentro de la interfaz.

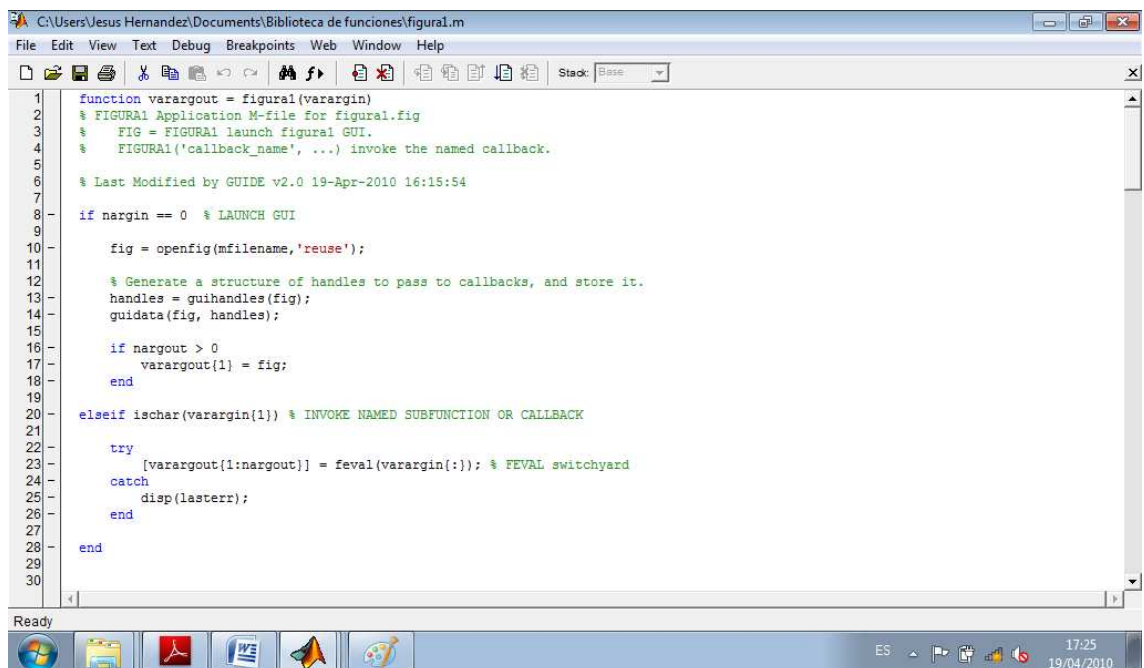


Ilustración 84 Fichero figura1.m

Lo que se ve en la ilustración 84, es el archivo de tipo “function” con la extensión característica de Matlab® “.m”. Este archivo es construido automáticamente por Matlab® y las líneas de código que aparecen son las que crean la interfaz que aparece en el archivo `figural.fig`.

Ahora, se va a seleccionar el botón “text” sobre la ventana para manipular el lienzo de la GUI que se está creando. Al hacerlo, el ratón permite seleccionar un área sobre la que se colocará el texto que se desea que aparezca sobre el lienzo de la GUI, tal y como se muestra en la ilustración 85 [17]:

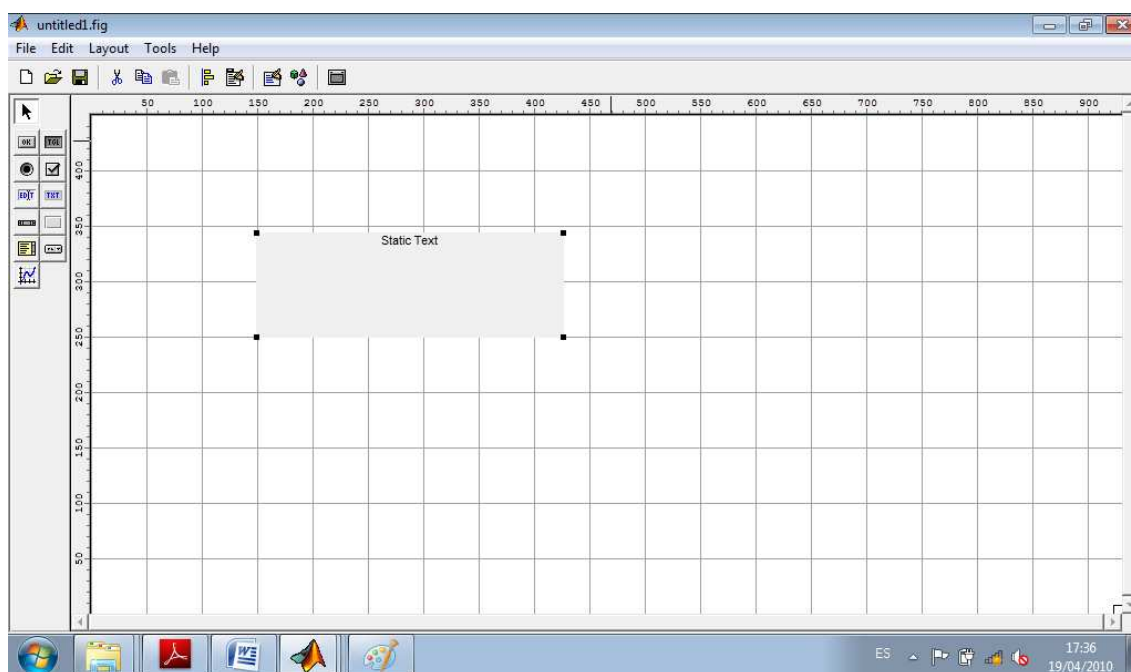


Ilustración 85 Creación de un cuadro de texto estático

Una vez ubicado el espacio de texto en el lugar deseado, se puede hacer “clic” sobre el objeto de texto y se desplegará una ventana desde la que se pueden cambiar las propiedades del espacio de texto creado, tal y como se puede observar en la ilustración 86:

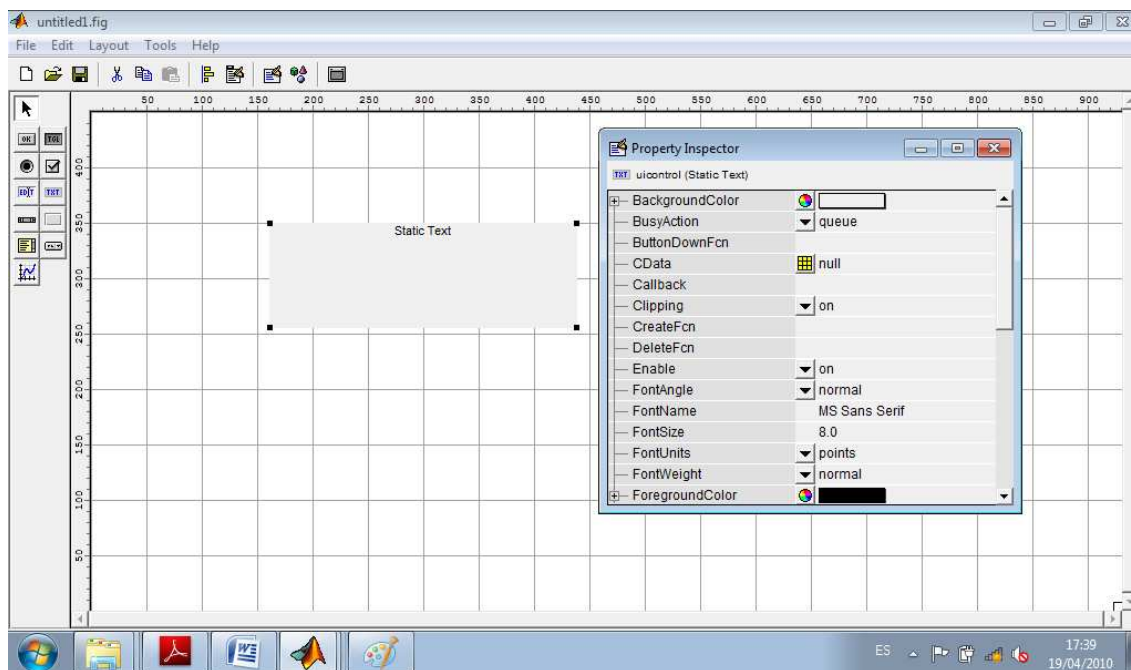


Ilustración 86 Ventana de Propety Inspector

A través de esta ventana pueden modificarse todos los parámetros referentes al espacio de texto creado, tales como color del fondo del campo, la fuente elegida para el texto, el string o cadena de caracteres, etc.

En esta ventana aparece un aspecto muy importante del cuadro de texto insertado. Ésta es el “**tag**”, que consiste en el nombre de la variable que Matlab® le asigna a este cuadro. Este nombre puede ser modificado [17].

Se ha procedido de la misma forma, insertando botonería, hasta completar la interfaz tal y como aparece en la ilustración 87:

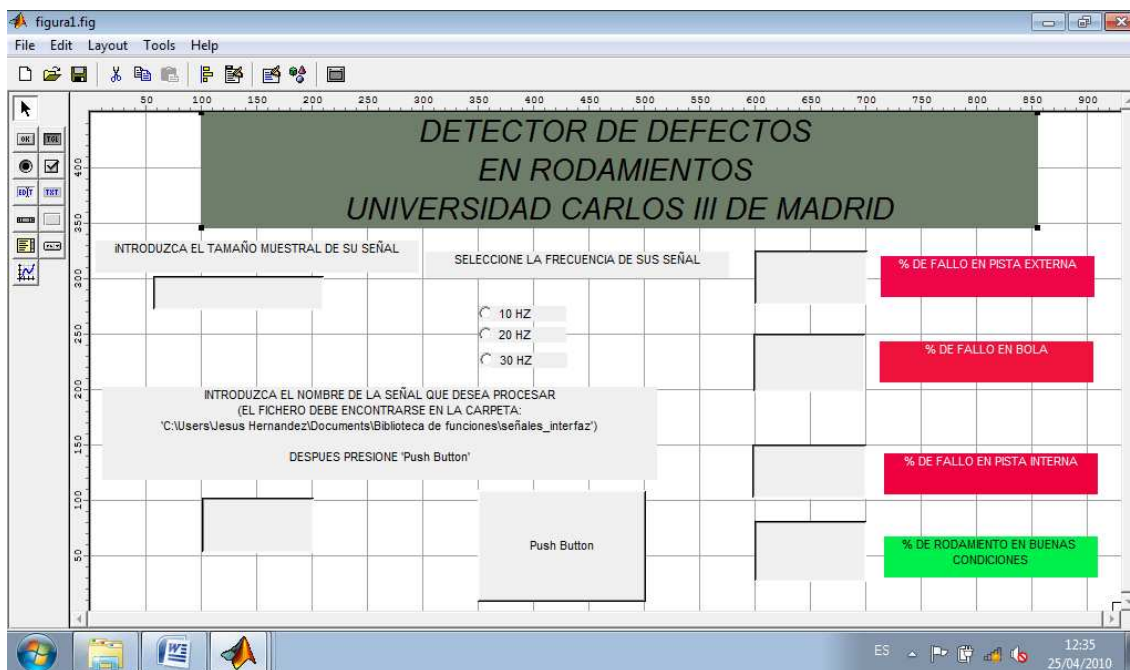


Ilustración 87 Formato final del archivo figura1.fig

Esta interfaz toma el nombre de una señal, de la que además se debe facilitar su tamaño muestral, así como la frecuencia a la que fue tomada y hace correr sobre ella el programa “miprograma3.m”. Los valores de pertenencia a cada tipo de rodamiento que son generados por este programa, son los que muestra nuestra GUI. Por este motivo, necesitamos asociar de alguna manera el script de “miprograma3.m” al pulsador (*Push Button*) de nuestra GUI. Es decir, se ha de describir el “callback” asociado al “pushbutton”.

Para ver los “callbacks” asociados a cada uno de los objetos que se han creado se ha de editar el archivo “figura1.m”.

En la ilustración 88 se muestra el aspecto final que tendrá el fichero “figura1.m”



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

```
% -----  
function varargout = pushbutton1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% Stub for Callback of the UIControl handles.pushbutton1.  
%disp('pushbutton1 Callback not implemented yet.')
```



```
botones(1)=get(handles.radiobutton1, 'Value');  
botones(2)=get(handles.radiobutton2, 'Value');  
botones(3)=get(handles.radiobutton3, 'Value');  
if botones(1)==1  
    op_boton=1;  
elseif botones(2)==1  
    op_boton=2;  
elseif botones(3)==1  
    op_boton=3;  
end  
archivo=get(handles.edit1, 'string');  
num_muestras = str2double(get(handles.edit8, 'string'));  
fs=5000; % Hz. Frecuencia de muestreo  
array_rmin=[30 60 90];  
array_rmax=[100 200 300];  
rangomin=array_rmin(op_boton);  
rangomax=array_rmax(op_boton);  
  
direccion=['C:\Users\Jesus Hernandez\Documents\Biblioteca de funciones\señales_interfaz\', archivo];  
  
A=load(direccion);  
  
[sol,t,f]=ht(A,fs);  
  
T=sol(num_muestras/2:num_muestras);  
Fsol=f(num_muestras/2:num_muestras);  
k=1;  
  
for j=1:num_muestras/2  
    if Fsol(j)>=rangomin  
        if Fsol(j)<=rangomax  
            Trango(k)=T(j);  
            Frango(k)=Fsol(j);  
            k=k+1;  
        end  
    end  
end  
end  
  
[T1 pos1]=max(Trango);  
f1=Frango(pos1);  
Trango(pos1)=0;  
  
[T2 pos2]=max(Trango);  
f2=Frango(pos2);  
Trango(pos2)=0;  
  
[T3 pos3]=max(Trango);  
f3=Frango(pos3);  
Trango(pos3)=0;  
  
datosfrec=strcat('Frec',num2str(i));  
datosfrec=[f1 f2 f3]  
  
posicion= [1 2 3];  
  
[MAX3 posicion3]=max(datosfrec);  
datosfrec(posicion3)=0;  
  
[MAX2 posicion2]=max(datosfrec);  
datosfrec(posicion2)=0;  
  
[MAX1 posicion1]=max(datosfrec);  
  
C = readfis('CLASS');  
  
array_MAX=[10 20 30];  
MAX=[MAX1 MAX2 MAX3]/array_MAX(op_boton);  
  
Porcentajes=evalfis(MAX, C)  
  
set(handles.edit3, 'string', Porcentajes(1));  
set(handles.edit2, 'string', Porcentajes(2));  
set(handles.edit4, 'string', Porcentajes(3));  
set(handles.edit5, 'string', Porcentajes(4));
```

Ilustración 88 Formato final del fichero figura1.m



Se observa cómo, por ejemplo, el objeto que Matlab[®] ha denominado “Pushbutton1” tiene dos funciones asociadas, una que es su “callback” y le da funcionalidad, y otra que es la que crea al objeto y le da apariencia. El propio programa de Matlab[®], da automáticamente sugerencias sobre las cosas que se pueden hacer con el objeto editado.

A través del comando “**get**”, seremos capaces de capturar el texto que el usuario haya introducido en el campo correspondiente [17]. Así, por ejemplo, si se escribe dentro del espacio definido para la función “callback” del “edit1”:

```
archivo=get(handles.edit1, 'string');
```

Entonces Matlab[®] creará una variable con nombre “archivo”, y esa variable será del tipo “String” (texto), y su valor será el texto introducido en ese espacio “edit1”.

Posteriormente se inserta el script del programa “miprograma3.m”.

Para acabar, se necesitan cuatro espacios en la GUI en los que presentar el resultado, o sea, el porcentaje de pertenencia a cada tipo de rodamiento. Para ello se van a crear cuatro espacios de texto que se dejarán en blanco (con un “string” vacío en la ventana del inspector de propiedades) y usará el comando “**set**” (lo contrario de “get”), para imponer los strings que hayan resultado de las operaciones realizadas por el script.

De este modo se escribirán los comandos:

```
set(handles.edit3, 'string', Porcentajes(1));  
set(handles.edit2, 'string', Porcentajes(2));  
set(handles.edit4, 'string', Porcentajes(3));  
set(handles.edit5, 'string', Porcentajes(4));
```

Es decir, con set se fija el valor de la variable asociada al objeto mostrar [17].

Una vez realizadas estas operaciones, se tiene el detector de fallos en rodamientos listo y con el aspecto que se muestra en la ilustración 89.

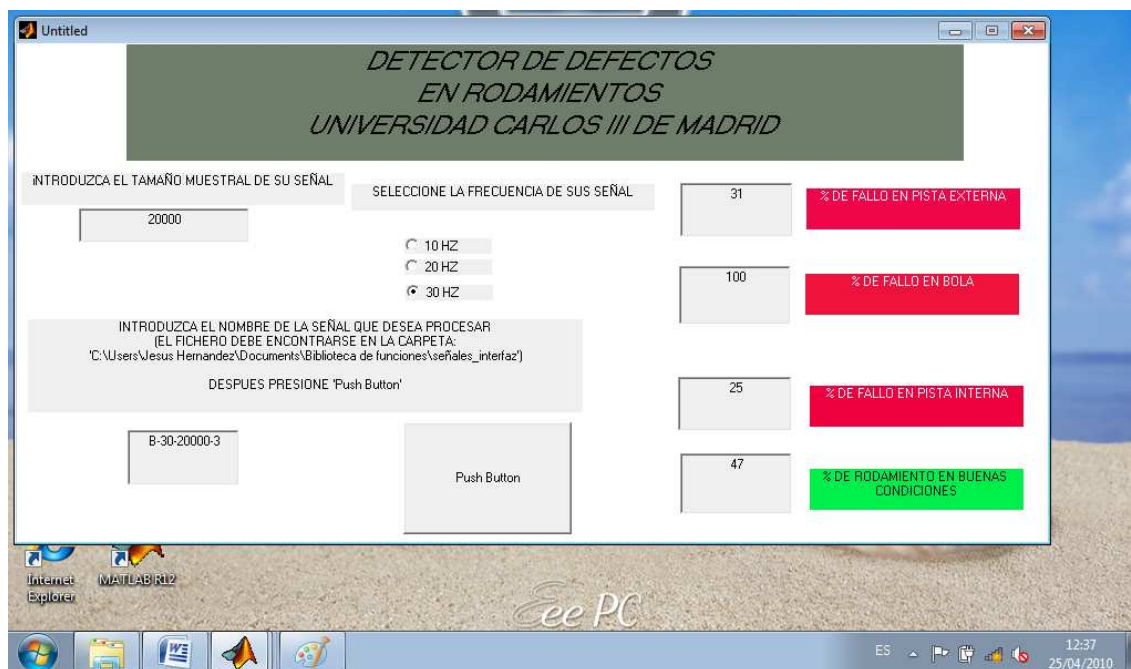


Ilustración 89 Ejemplo de utilización del interfaz gráfico

5 CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

5.1 CONCLUSIONES

Se ha conseguido elaborar un sistema de identificación de defectos en rodamientos, con unas tasas de acierto que varían entre el 90 y el 100%, por lo que el objetivo principal del proyecto de diseñar un método de mantenimiento predictivo para rodamientos se considera cumplido en su totalidad.

Para probar el sistema diseñado, se utilizaron señales de vibración resales obtenidas mediante el banco de ensayos “Rotor Kit MFS 2004” [15].

En una primera etapa del proyecto, se obtuvieron los espectros de frecuencia de las señales de vibración correspondientes a distintos tipos de rodamientos. Primero, simplemente mediante la transformada de Fourier y posteriormente mediante un programa combinado que aplicaba la transformada de Hilbert y Fourier a la señal temporal.

Tras esto se procedió a elaborar un clasificador basado en la lógica difusa, capaz de identificar automáticamente si el rodamiento presentaba algún defecto y dónde estaba localizado.

A continuación, a partir de los resultados obtenidos, se presenta las siguientes conclusiones:

- En cuanto al procesamiento de la señal:
 - Mediante la representación de la señal en el dominio del tiempo, no se obtuvo información útil para identificar un tipo concreto de defecto, debido al elevado nivel de ruido de la señal que además se ve incrementado con la velocidad de giro del eje. No obstante esta representación puede indicarnos la presencia de algún defecto ya que



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

la amplitud de las vibraciones es mucho mayor en los rodamientos dañados.

- La Transformada de Fourier se muestra ineficaz a la hora de intentar localizar las frecuencias naturales de fallo.
 - La transformada de Hilbert, como filtro previo al análisis frecuencial mediante la Transformada de Fourier, se muestra como una herramienta mucho más potente que la representación temporal y la transformada de Fourier para el análisis frecuencial de señales de vibración.
 - La combinación de las transformadas de Hilbert y Fourier, permite obtener mejores resultados cuanto mayor es la velocidad de giro del eje. Por este motivo, a la hora de elaborar el clasificador de lógica difusa, se seleccionó como velocidad de giro del eje la mayor de las posibles en este proyecto (30Hz).
 - El error medio cometido al estimar la frecuencia de defecto ha sido de un 1.09%. Siendo en el peor de los casos de un 2.03%. Estos porcentajes de error tan bajos hacen pensar que los rodamientos empleados no tenían defectos incipientes, sino bastante desarrollados.
- En cuanto a la elaboración del clasificador basado en lógica difusa:
- A la hora de construir el clasificador difuso, la pega más importante fue que la frecuencia natural de fallo en pista interna era significativamente más grande que las demás frecuencias naturales de fallo. Por este motivo se tomaron frecuencias entre los 90 y los 300Hz para dar oportunidad a que el segundo múltiplo de la frecuencia natural de fallo en pista interna apareciese.
 - Las tasas de acierto mostradas por el programa para la identificación de cada tipo de rodamiento fueron muy elevadas, por lo que el



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

objetivo principal del proyecto, de construir un sistema de detección de fallos en rodamientos se considera cumplido. Estas tasas variaron entre el 90% y el 100%. Esta pequeña caída en la tasa de acierto se debía a que el programa confundía en contadas ocasiones un rodamiento normal con un rodamiento con fallo en bola o en la pista exterior. No obstante al estar considerando un rodamiento normal como dañado, en este pequeño porcentaje de ocasiones, nos encontramos del lado de la seguridad.

- En cuanto a la optimización del clasificador basado en lógica difusa, para que funcione con independencia de la velocidad de rotación del eje:
 - Tras la construcción de un clasificador independiente de la velocidad de giro del eje, se observó como la tasa de acierto en la identificación de rodamientos, va disminuyendo a medida que lo hace la velocidad de rotación.



5.2 FUTUROS DESARROLLOS

Dado que el porcentaje de acierto a la hora de identificar un rodamiento en buenas condiciones es menor que en los demás casos, se propone desarrollar o modificar el clasificador difuso para que permita alcanzar tasas de éxito similares a las obtenidas al identificar otros tipos de rodamiento.

Otra línea de desarrollo sería la implantación del interfaz gráfico dentro del sistema productivo de una fábrica, consiguiendo sincronizar la tarjeta de adquisición de datos con el interfaz gráfico, así como desarrollar más en profundidad éste último, consiguiendo hacerlo independiente del modelo de rodamiento.

Por último, otro aspecto que se podría desarrollar, será someter al sistema diseñado, a pruebas con rodamientos de distintas características geométricas y distintos tamaños de defecto.



6 BIBLIOGRAFÍA

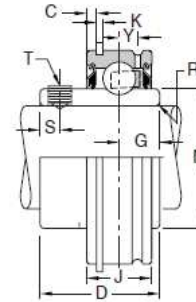
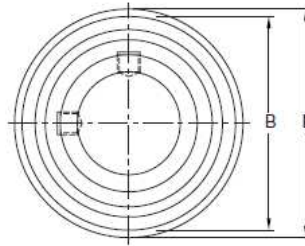
- [1] RUBIO, H, “Diseño mecánico” Apuntes de cuarto curso de la titulación ingeniería industrial. Universidad pública Carlos III de Madrid España, (2008).
- [2] SKF, “SKF Maintenance Products,” SKF ©, (2008).
- [3] WHITE, G, “introducción a Vibración de Máquinas,” Part Number 8569, versión 1.75, DLI Engineering, (1995).
- [4] ERICSON, S, GRIP, N, JOHANSON, E, PERSON, L, . SJÖBERG, R, y STRÖMBERG, J . “Automatic Detection of Local Bearing Defects in Rotating Machines Part 1,” Departamento de Matematicas de la Universidad Tecnológica de Lula, (2001).
- [5] BRAUN, S, “Analysis of Roller/Ball Bearing Vibrations,” ASME Publication. Paper n° 118/vol. 101, (1979).
- [6] ESTUPIÑAN, E, “Diagnostico de Fallas en Máquinas de Baja Velocidad Utilizando Análisis de Vibraciones,” “Tesis presentada para obtener el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción – Chile, (2001).
- [7] MEIROVITCCH, L, “Elements of Vibration Analysis,” Second edition Mc Graw-Hill Book Company, (1986).
- [8] STEVENS, D, ”Machinery, Condition Monitoring". Disponible en: <http://web.ukonline.co.uk/d.stevens2/>.
- [9] RUBIO, H. “Caracterización de defectos localizados en sistemas mecánicos rotativos mediante análisis de vibraciones”. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, (2003).
- [10] BRAUN, S. “Discovering signal processing. An interactive guide for engineers”. Israel Institute of Technology, Israel, (2008).
- [11] CHANG, R, “Química”, (2007)
- [12] THE MARHWORKS INC. “Fuzzy Logic Toolbox 2 User’s Guide”, (2009). Disponible en: http://www.mathworks.es/academia/student_center/tutorials/launchpad.html.
- [13] “Fundamentos de lógica difusa”. Documento interno Universidad de las Américas-Puebla. Disponible en: <http://www.powerpointgratis.net/logica-difusa-fundamentos/1/>
- [14] MUKAIDONO, M. “Fuzzy logic for beginners”. World Scientific, (2001).



- [15] MARTINEZ, I. “Detección de fallos en rodamientos mediante análisis de energía y lógica difusa”. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, (2007).
- [16] LARA, O, J. “Nuevas metodologías no invasivas de diagnosis de defectos incipientes en rodamientos de bola”. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, (2007).
- [17] THE MARHWORKS INC. “GUI Building Tutorial”, (2005). Disponible en: http://www.mathworks.es/academia/student_center/tutorials/launchpad.html.

7 ANEXOS

7.1 HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL RODAMIENTO.



Shaft Dia. mm Inches	Bearing Number	Basic Size	Bore Tolerance	B	C	D	G	J	K	L	N	R	S	T Tap Size	Y	Unit wt. (lbs/kg)
20	ER8 ER10 ER12	204	+0.0007-0.0000 +0.018-0.000	1.8504 47.000	3/32	1 7/32	.405 10.29	.6240 15.850	3/64	2 1/16	.941	.040	15/64	#10-32 #10-32 1/4-28 M6X1	.142 3.61	0.62 0.55 0.54 0.2
25	ER14 ER15 ER16 ER205	205	+0.0007-0.0000 +0.018-0.000	2.0472 52.000	3/32	1 3/8	.508 12.90	.7490 19.025	3/64	2 17/64	1.313	.040	15/64	1/4-28 M6X1	.185 4.70	0.65 0.63 0.61 0.3
30	ER18 ER19 ER20S ER206	206	+0.0007-0.0000 +0.018-0.000	2.4409 62.000	3/32	1 1/2	.625 15.88	.8740 22.200	3/64	2 21/32	1.587	.040	1/4	1/4-28 M8X1.25	.224 5.69	0.96 0.94 0.90 0.4
35	ER20 ER22 ER23	207	+0.0008-0.0000 +0.020-0.000	2.8346 72.000	1/8	1 11/16	.688 17.48	.9365 23.787	1/16	3 5/64	1.847	.040	21/64	5/16-24 M8X1.25	.256 6.50	1.75 1.70 1.62 0.8
40	ER24 ER208	208	+0.0008-0.0000 +0.020-0.000	3.1496 80.000	1/8	1 15/16	.750 19.05	1.0927 27.755	1/16	3 25/64	2.083	.062	3/8	5/16-24 M8X1.25	.297 7.54	2.18 1.0
45	ER26 ER27 ER28	209	+0.0008-0.0000 +0.020-0.000	3.3465 85.000	1/8	1 15/16	.750 19.05	1.0927 27.755	1/16	3 19/32	2.281	.062	3/8	5/16-24 M8X1.25	.297 7.54	2.28 2.22 2.15 1.0
50	ER30 ER31	210	+0.0008-0.0000 +0.020-0.000	3.5433 90.000	1/8	2 1/32	.750 19.05	1.1240 28.550	3/32	3 25/32	2.475	.062	3/8	3/8-24 M10X1.5	.265 6.73	2.75 2.61 1.2
55	ER32 ER35	211	+0.0009-0.0000 +0.023-0.000	3.9370 100.000	1/8	2 3/16	.875 22.22	1.1860 30.124	3/32	4 11/64	2.749	.080	3/8	3/8-24 M10X1.5	.298 7.57	3.38 3.07 1.4
60	ER36 ER38 ER39	212	+0.0009-0.0000 +0.023-0.000	4.3307 110.000	1/8	2 9/16	1.000 25.4	1.2490 31.725	3/32	4 9/16	3.012	.080	3/8	3/8-24 M10X1.5	.330 8.38	4.48 4.38 4.19 1.9
70	ER40 ER43	214	+0.0009-0.0000 +0.023-0.000	4.9213 125.000	5/32	2 3/4	1.062 27.0	1.3740 34.900	7/64	5 9/32	3.433	.080	3/8	3/8-24 M10X1.5	.374 9.50	5.92 5.49 2.5
75	ER46 ER47	215	+0.0009-0.0000 +0.023-0.000	5.1181 130.000	5/32	3 1/16	1.313 33.32	1.4990 38.075	7/64	5 1/2	3.632	.080	3/8	3/8-24 M10X1.5	.374 9.50	6.60 6.37 2.9
80	ER48 ER51	216	+0.0009-0.0000 +0.023-0.000	5.5118 140.000	5/32	3 1/4	1.313 33.32	1.6865 42.837	7/64	5 7/8	3.920	.120	3/8	3/8-24 M10X1.5	.406 10.31	8.05 7.56 3.4

†Bearing O.D. tolerance: 204 basic size, +.0000"-.0005" (+0.000mm-0.013mm); 205 thru 208 basic size, +.0000"-.0006", +0.000mm-0.015mm); 209 thru 212 basic size, +.0000"-.0008" (+0.000mm-0.020mm); 214 thru 216 basic size, +.0000"-.0010" (+0.000mm-0.025mm)

Ilustración 90 Hoja de características del rodamiento utilizado

7.2 HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL ACELERÓMETRO.

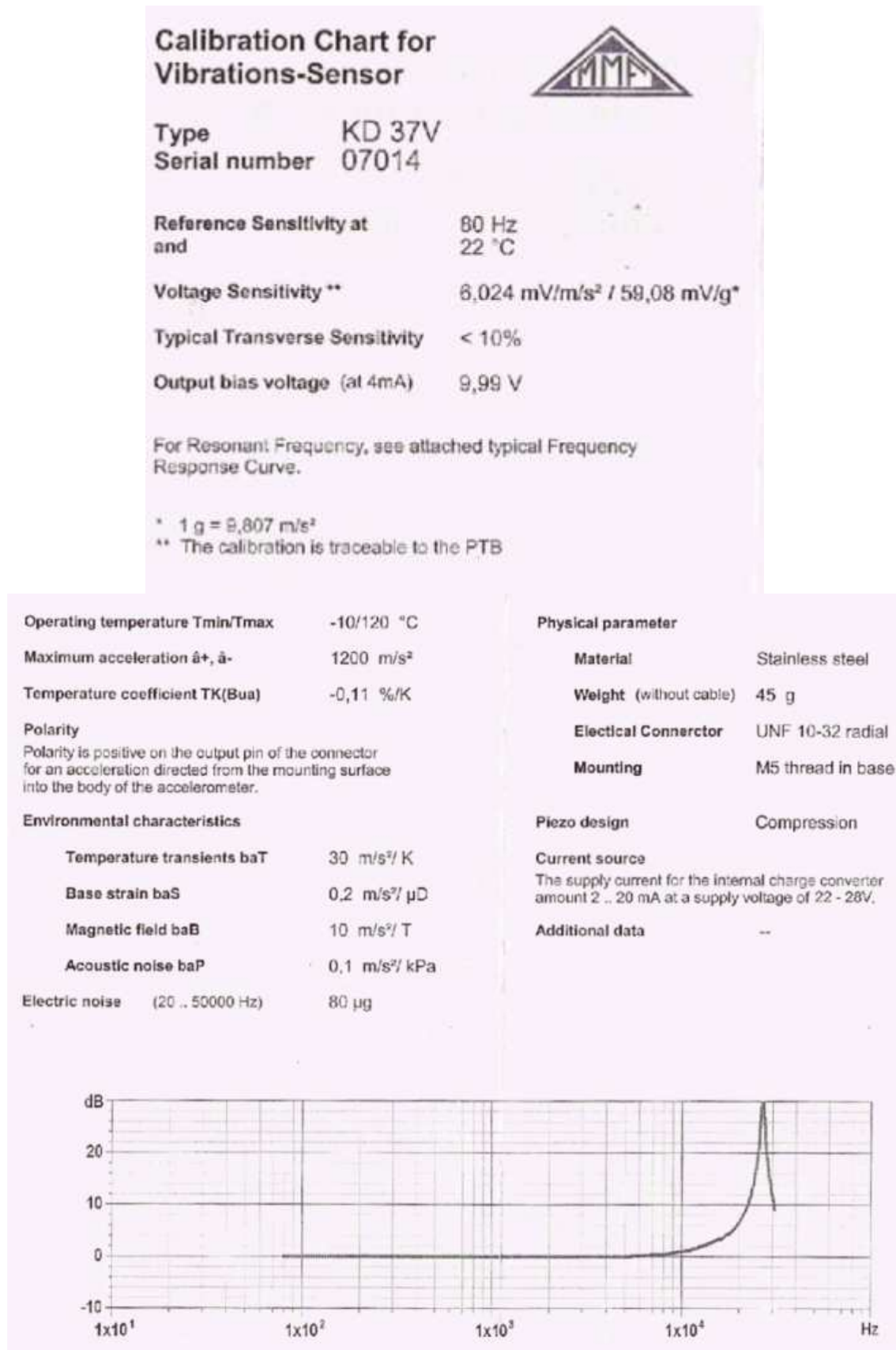


Ilustración 91 Hoja de características del acelerómetro utilizado

7.3 REGLAS DIFUSAS UTILIZADAS

[Rules]	
1	2 0 0, 1 0 0 0 (0.33) : 1
2	0 2 0, 1 0 0 0 (0.33) : 1
3	0 0 2, 1 0 0 0 (0.33) : 1
4	4 0 0, 1 0 0 0 (0.33) : 1
5	0 4 0, 1 0 0 0 (0.33) : 1
6	0 0 4, 1 0 0 0 (0.33) : 1
7	8 0 0, 1 0 0 0 (0.33) : 1
8	0 8 0, 1 0 0 0 (0.33) : 1
9	0 0 8, 1 0 0 0 (0.33) : 1
10	2 4 0, 1 0 0 0 (0.66) : 1
11	2 0 4, 1 0 0 0 (0.66) : 1
12	0 2 4, 1 0 0 0 (0.66) : 1
13	2 8 0, 1 0 0 0 (0.66) : 1
14	2 0 8, 1 0 0 0 (0.66) : 1
15	0 2 8, 1 0 0 0 (0.66) : 1
16	4 8 0, 1 0 0 0 (0.66) : 1
17	4 0 8, 1 0 0 0 (0.66) : 1
18	0 4 8, 1 0 0 0 (0.66) : 1
19	4 4 0, 1 0 0 0 (0.66) : 1
20	4 0 4, 1 0 0 0 (0.66) : 1
21	0 4 4, 1 0 0 0 (0.66) : 1
22	2 4 8, 1 0 0 0 (1) : 1
23	2 4 4, 1 0 0 0 (1) : 1
24	1 0 0, 0 1 0 0 (0.33) : 1
25	0 1 0, 0 1 0 0 (0.33) : 1
26	0 0 1, 0 1 0 0 (0.33) : 1
27	6 0 0, 0 1 0 0 (0.33) : 1
28	0 6 0, 0 1 0 0 (0.33) : 1
29	0 0 6, 0 1 0 0 (0.33) : 1
30	1 1 0, 0 1 0 0 (0.66) : 1
31	1 0 1, 0 1 0 0 (0.66) : 1
32	0 1 1, 0 1 0 0 (0.66) : 1
33	1 6 0, 0 1 0 0 (0.66) : 1
34	1 0 6, 0 1 0 0 (0.66) : 1
35	0 1 6, 0 1 0 0 (0.66) : 1
36	6 6 0, 0 1 0 0 (0.66) : 1
37	6 0 6, 0 1 0 0 (0.66) : 1
38	0 6 6, 0 1 0 0 (0.66) : 1
39	1 1 6, 0 1 0 0 (1) : 1
40	1 6 6, 0 1 0 0 (1) : 1
41	10 0 0, 0 0 1 0 (0.33) : 1
42	0 10 0, 0 0 1 0 (0.33) : 1
43	0 0 10, 0 0 1 0 (0.33) : 1
44	7 0 0, 0 0 1 0 (0.33) : 1



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

45	0 7 0, 0 0 1 0 (0.33) : 1
46	0 0 7, 0 0 1 0 (0.33) : 1
47	9 0 0, 0 0 1 0 (0.33) : 1
48	0 9 0, 0 0 1 0 (0.33) : 1
49	0 0 9, 0 0 1 0 (0.33) : 1
50	8 0 0, 0 0 1 0 (0.33) : 1
51	0 8 0, 0 0 1 0 (0.33) : 1
52	0 0 8, 0 0 1 0 (0.33) : 1
53	10 7 0, 0 0 1 0 (0.66) : 1
54	10 0 7, 0 0 1 0 (0.66) : 1
55	0 10 7, 0 0 1 0 (0.66) : 1
56	10 9 0, 0 0 1 0 (0.66) : 1
57	10 0 9, 0 0 1 0 (0.66) : 1
58	0 10 9, 0 0 1 0 (0.66) : 1
59	7 9 0, 0 0 1 0 (0.66) : 1
60	7 0 9, 0 0 1 0 (0.66) : 1
61	0 7 9, 0 0 1 0 (0.66) : 1
62	10 8 0, 0 0 1 0 (0.66) : 1
63	10 0 8, 0 0 1 0 (0.66) : 1
64	0 10 8, 0 0 1 0 (0.66) : 1
65	7 8 0, 0 0 1 0 (0.66) : 1
66	7 0 8, 0 0 1 0 (0.66) : 1
67	0 7 8, 0 0 1 0 (0.66) : 1
68	10 10 0, 0 0 1 0 (0.66) : 1
69	10 0 10, 0 0 1 0 (0.66) : 1
70	0 10 10, 0 0 1 0 (0.66) : 1
71	10 7 9, 0 0 1 0 (1) : 1
72	10 7 8, 0 0 1 0 (1) : 1
73	10 10 7, 0 0 1 0 (1) : 1
74	3 0 0, 0 0 0 1 (0.5) : 1
75	0 3 0, 0 0 0 1 (0.5) : 1
76	0 0 3, 0 0 0 1 (0.5) : 1
77	5 0 0, 0 0 0 1 (0.5) : 1
78	0 5 0, 0 0 0 1 (0.5) : 1
79	0 0 5, 0 0 0 1 (0.5) : 1
80	7 0 0, 0 0 0 1 (0.5) : 1
81	0 7 0, 0 0 0 1 (0.5) : 1
82	0 0 7, 0 0 0 1 (0.5) : 1
83	3 5 0, 0 0 0 1 (0.8) : 1
84	3 0 5, 0 0 0 1 (0.8) : 1
85	0 3 5, 0 0 0 1 (0.8) : 1
86	5 5 0, 0 0 0 1 (0.8) : 1
87	5 0 5, 0 0 0 1 (0.8) : 1
88	0 5 5, 0 0 0 1 (0.8) : 1
89	5 7 0, 0 0 0 1 (0.8) : 1
90	5 0 7, 0 0 0 1 (0.8) : 1



-LÓGICA DIFUSA PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

91	0 5 7, 0 0 0 1 (0.8) : 1
92	3 5 5, 0 0 0 1 (1) : 1
93	5 5 7, 0 0 0 1 (1) : 1
94	11 0 0, 0 1 0 0 (0.33) : 1
95	0 11 0, 0 1 0 0 (0.33) : 1
96	0 0 11, 0 1 0 0 (0.33) : 1
97	1 11 0, 0 1 0 0 (0.66) : 1
98	1 0 11, 0 1 0 0 (0.66) : 1
99	0 1 11, 0 1 0 0 (0.66) : 1
100	6 11 0, 0 1 0 0 (0.66) : 1
101	6 0 11, 0 1 0 0 (0.66) : 1
102	0 6 11, 0 1 0 0 (0.66) : 1
103	1 6 11, 0 1 0 0 (1) : 1
104	4 10 7, 0 0 1 0 (1) : 1
105	4 10 8, 0 0 1 0 (1) : 1
106	4 4 8, 1 0 0 0 (1) : 1